

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

# **ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ**

XX Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 2

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.  
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,  
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.  
ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

№ 3

Новосибирск  
СГУГиТ  
2024

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, академик РАН, профессор, научный руководитель АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья» (АО «СНИИГГиМС»), научный руководитель Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск  
*М. И. Эпов*

Доктор физико-математических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, директор Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск  
*В. Н. Глинских*

Кандидат технических наук, директор Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск  
*А. П. Хмелинин*

Доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск  
*Б. Л. Никитенко*

Доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск  
*Л. М. Бурштейн*

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс, 15–17 мая 2024 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 2: Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. № 3. – 314 с. – ISSN 2618-981X. – Текст : непосредственный.

DOI 10.33764/2618-981X-2024-2-3

В сборнике опубликованы материалы XX Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

Издание может содержать сведения об иностранных агентах

*И. В. Тищенко*

## **Компоновка проходчика для сооружения скважин в грунтовом массиве**

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
e-mail: ighor.tishchienko.70@mail.ru

**Аннотация.** Повышение конкурентоспособности пневмоударной техники должно сопровождаться расширением спектра ее технологических возможностей. Решение поставленной задачи может быть осуществлено за счет создания на ее основе оборудования для проходки скважин с частичным уплотнением и экскавацией грунта. В статье приведен краткий анализ известных способов сооружения подземных каналов с акцентом на создание грунтопроходческого комплекса циклического действия с приводом от пневматического генератора ударных импульсов и силового тягового механизма так же работающего от энергии сжатого воздуха. В соответствии с поставленной задачей рассмотрены предлагаемые варианты компоновки оборудования. Отмечены особенности их рационального применения в контексте с реализацией бестраншейных способов сооружения подземных переходов. Предложены конструкции грунтопроходческих устройств емкостного и перепускного типов.

**Ключевые слова:** бестраншейная прокладка, скважина, проходка, пневмопробойник, ударное воздействие, тяговое усилие, грунтовый массив

*I. V. Tishchenko*

## **Construction of the tunneling machine for boreholes in the soil mass**

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia  
e-mail: ighor.tishchienko.70@mail.ru

**Abstract.** Increase of competitiveness of pneumatic impact equipment is accompanied by expansion of the range of its technological capabilities. The solution of the set task is achieved by creating on its basis the equipment for borehole sinking with partial compaction and soil excavation. The article a brief analysis of known methods for constructing underground channels by suitable pneumatic equipment for creating a tunneling machine of cyclic are provided. In accordance with the task at hand, variants of equipment construction are considered. The peculiarities of their rational application in trenchless methods of the making hole are marked. Designs of the tunneling machine of with a working organ of capacitive and of a bypassing types are offered.

**Keywords:** trenchless pipelaying, hole, making hole, pneumodrift, impact force, tractive effort, soil mass

### ***Введение***

Прокладка коммуникаций для возводимых и реконструируемых объектов является важной составляющей строительного комплекса [1]. На сегодняшний момент все известные способы ведения работ делятся на две основных группы:

- открытые технологии, связанные с разработкой траншей и котлованов землеройными машинами;

- закрытые, в основе которых лежит проходка скважин и микротоннелей широкой номенклатурой технических средств без вскрытия поверхностного грунтового слоя.

Прогрессивные методы сооружения подземных переходов с максимально возможным сохранением дорожного полотна и природного ландшафта получили широкое развитие в 70-х и 80-х годах прошлого столетия [2]. В большей степени это было связано с появлением на рынке специальных устройств – автономных пневмопробойников и пневмомолотов конструкции ИГД СО РАН, использующих сжатый воздух передвижных компрессорных установок [3]. С их помощью стали активно прокладывать подземные каналы методами виброударного прокалывания и продавливания [4]. Для первого из них характерно полное перемещение вытесняемого объема грунта в стенки скважины, а для второго – использование металлической обсадной трубы в качестве инструмента к которому прилагается силовая импульсная нагрузка для его перемещения в породном массиве и последующем удалении образовавшегося грунтового керна в затрубное пространство.

Другим перспективным направлением является реализация на базе пневмоударной техники комбинированного способа проходки с разделением грунтовой массы на две фракции, одна из которых служит для укрепления стенок образуемого канала, а другая – удаляется за его пределы в рабочий приямок.

Первая попытка создания опытного образца оборудования непрерывного действия для реализации данной технологии заключалась в оснащении базовой машины – пневмопробойника 1 (рис. 1) кольцевым режущим рабочим органом 2 [5]. При этом часть проходящего через него грунта удалялась по проложенному ранее технологическому каналу 3 воздушным потоком. За пределами машины оставалась скважина 4, соответствующая требуемому проектному диаметру и направлению.

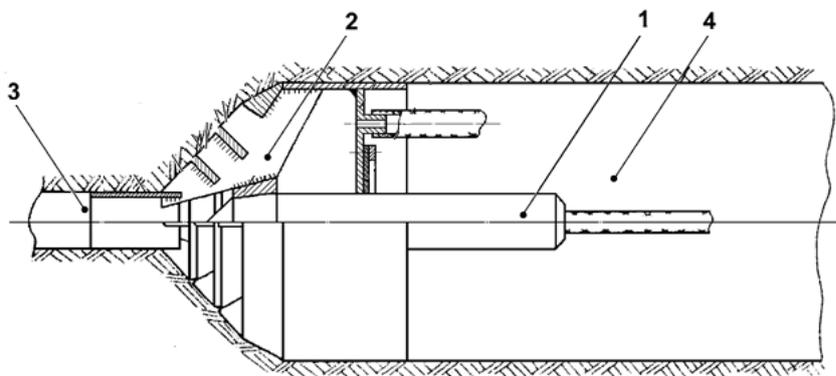


Рис. 1. Проходческая установка с пневмотранспортированием грунта:  
1 – пневмопробойник; 2 – рабочий орган; 3 – технологический канал; 4 – проектная скважина

Несмотря на свою привлекательность, данное направление не получило дальнейшего развития из-за выявленных недостатков:

- неудовлетворительная производительность, особенно на тяжелых грунтах;
- частое зависание транспортируемой грунтовой массы с образованием пробки в используемом для этого технологическом канале и, как следствие, остановками процесса;
- отсутствие механизма коррекции траектории движения грунтопроходчика с потерей заданного направления прокладываемой скважины.

Начиная с конца 90-х начала 2000 годов и по настоящее время широкое распространение в данном сегменте строительного производства получили установки горизонтального направленного бурения [6]. Такая тенденция обуславливается высокой производительностью оборудования, возможностью использовать неметаллические трубы без каких-либо ограничений, способностью корректировать направление проходки скважины в соответствии с проектной трассой перехода. К наиболее существенным недостаткам следует отнести:

- необходимость использования закрепительного раствора на основе бентонитовой глины;
- невозможность исключения размыва стенок канала с появлением пустот и каверн в зоне забоя, которые в дальнейшем могут привести к аварийным ситуациям, обусловленным обрушением вышерасположенных слоев грунта с повреждением дорожного покрытия.

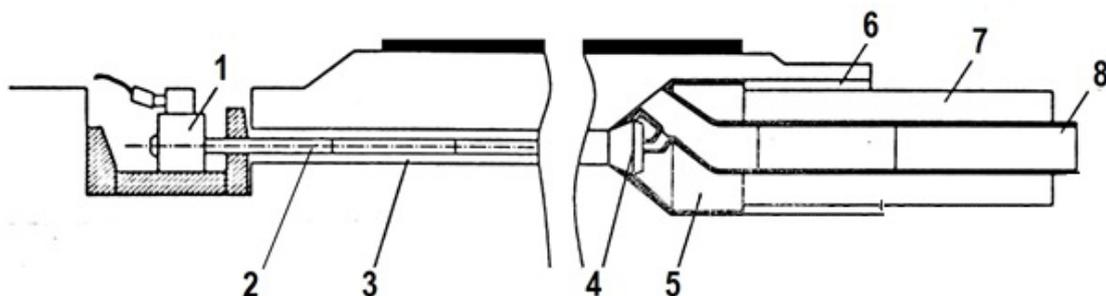


Рис. 2. Экспериментальная буровая установка с прямой схемой продувки:

- 1 – вращательно-подающий механизм; 2 – буровая колонна; 3 – пионерный канал; 4 – пневмоударник; 5 – расширитель; 6 – проектная скважина; 7 – обсадная труба; 8 – шламопровод

Учитывая характерные особенности и области рационального применения оборудования непрерывного действия, представленного на рис. 1 и буровых комплексов горизонтального направленного бурения, в ИГД СО РАН предложена концепция гибридной проходческой установки с прямой схемой продувки (рис. 2). Ее основная идея заключалась в создании более благоприятных условий для использования эффекта пневмотранспортирования грунта [7]. Для этого крутящий момент и напорное усилие от блока вращателя с подачиком 1, заимствованного от типовой установки «Impakt Drilling» [8] передается посредством бу-

ровой колонны 2, размещенной в пионерной скважине 3 на пневмоударник 4 с расширителем 5. В результате образуется проектная скважина 6 с обсадной трубой 7, а излишки грунтовой массы попадают во вращающийся шламопровод 8 и выносятся в приямок. Таким образом реализуется «сухой» способ прокладки коммуникаций с исключением необходимости использования закрепительного глиняного раствора, а наличие специального крутящегося технологического трубопровода создает более благоприятные условия для реализации эффекта пневмотранспортирования грунта. К существенным недостаткам можно отнести усложнение и удорожание оборудования, а также необходимость использование двух видов энергоносителя: рабочей жидкости для привода вращательно-подающего механизма и сжатого воздуха для питания пневмоударника и удаления грунтового керна. Это усложняет обслуживание и эксплуатацию оборудования.

### *Цель работы*

Обоснование компоновочной схемы и конструктивных особенностей оборудования циклического действия для проходки скважин с частичным уплотнением и экскавацией грунта.

### *Способ проходки и оборудование*

Технология циклической проходки скважин комбинированным способом характеризуется совокупностью последовательных воздействий на породный массив и состоит из набора определенных операций [8] (рис. 3).

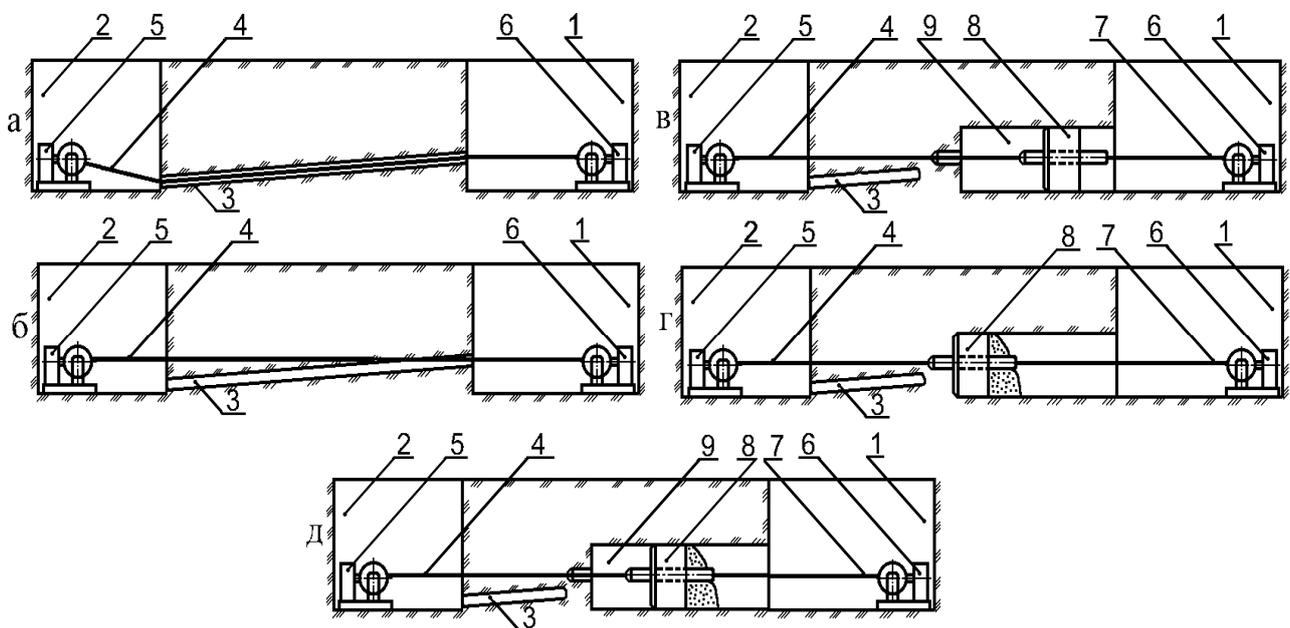


Рис. 3. Стадии проходки скважины комбинированным методом: 1 – рабочий приямок; 2 – выходной приямок; 3 – пионерная скважина; 4 – подающая гибкая связь; 5 – основной тяговый орган; 6 – дополнительный тяговый орган; 7 – возвращающая гибкая связь; 8 – грунтопроходчик; 9 – прокладываемая

В него входят как подготовительные, так и основные операции, включающие:

- размещение подающей гибкой связи 4 в образованной ранее с помощью пневмопробойника пионерной скважине 3 (рис. 3, а);

- в случае необходимости при значительном отклонении пионерного канала 3 от проектной трассы перехода выполнение коррекции продольной оси скважины путем прорезания грунта гибким режущим органом (рис. 3, б);

- доставка к забою грунтоработывающего устройства 8, соединенного с силовым тяговым органом 5 посредством подающей гибкой связи 4 (рис. 3, в);

- перемещение забоя грунтоработывающим устройством 8 при работе его ударного механизма и постоянном усилии подачи со стороны силового тягового органа 5 (рис. 3, г);

- эвакуация грунтоработывающего устройства 8 с набранным грунтом из образуемой скважины 9 извлекающим тяговым органом 6 с возвращающей гибкой связью 7 (рис. 3, д).

Основным конструктивным элементом такой проходческой установки является грунтопроходчик, определяющий структуру и параметры как всего комплекса, так и его отдельных составных частей и напрямую влияющий на технологические возможности оборудования. Его основными параметрами, во многом определяющими производительность проходки, являются величина и скорость перемещения забоя, а также количество извлекаемого грунтового керна за каждый отдельный один рабочий цикл.

Исследования, проведенные в лаборатории Механизации горных работ ИГД СО РАН [9 - 11], позволили определить рациональную с точки зрения обеспечения отмеченных выше требований конструкцию грунтоработывающего устройства. В него входит несколько основных функциональных элементов:

1. Лидирующая носовая часть, напрямую связанная с подающим тяговым канатом.

2. Режущий орган, непосредственно взаимодействующий с забоем и разделяющий весь объем грунта на уплотняемую и извлекаемую фракции.

3. Калибрующая обечайка, обеспечивающая формирование стенок скважины.

4. Грунтоприемная полость, служащая для размещения в ней транспортируемой грунтовой массы.

5. Импульсный привод для разработки забойной зоны ударным методом.

Конструктивная схема определяет компоновку, взаиморасположение и геометрию исполнения данных основных элементов.

В зависимости от их формы, взаиморасположения можно выделить несколько основных вариантов компоновки (рис. 4). В устройствах первой группы ударный привод находится в пределах режущего органа и грунтоприемной капсулы (рис. 4, а, в, д). Такая компоновка позволяет сократить общую длину грунтопроходчика и требуемые размеры технологического приямка. Однако при этом фактор пережатия внутреннего сечения рабочего органа и создания тем самым дополнительного сопротивления на прохождение через него грунтового керна,

накладывает существенные ограничения на массогабаритные и энергетические характеристики устанавливаемого ударного привода.

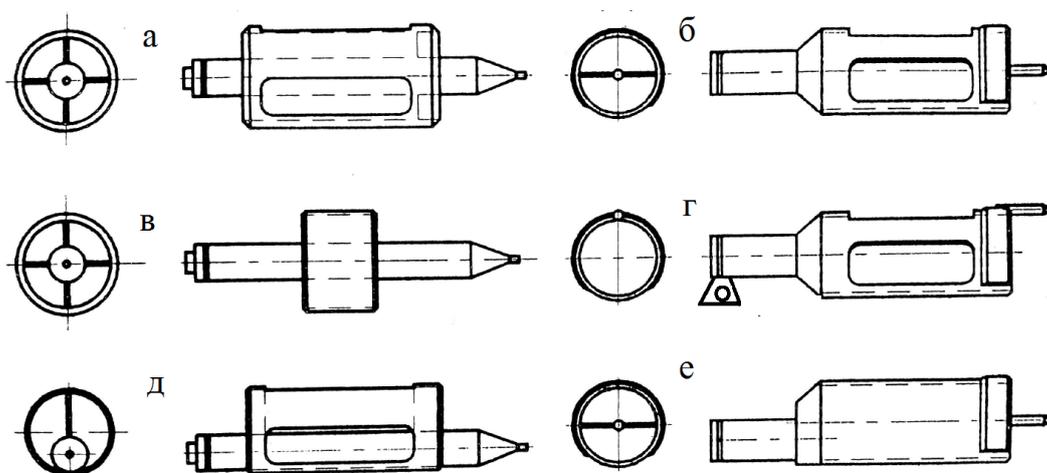


Рис.4. Варианты взаиморасположения узлов грунтотходчика

В устройствах, изображенных на рис. 4, б, г, е приводной импульсный генератор закреплен на задней поперечной перегородке капсулы, что облегчает набор разрабатываемого грунта и возможных более крупных включений. Так же снимаются ограничения по размерам и энергетической компоненте ударной мощности привода. Вместе с тем происходит смещение назад центра тяжести всего грунтотходчика, что может приводить к его перекоосу при движении по скважине и подрезанию ее стенок. Появляется необходимость установки дополнительной задней опоры в виде скользящей лыжи, которая может быть выполнена из легкого композитного материала, например, полиамида (рис. 4, г).

Наиболее эффективно передача ударного импульса от привода на рабочий орган осуществляется при их соосном взаиморасположении (рис. 4, а, б, в, г). При этом схема на рис. 4, в рассчитана на работу с перепуском грунта через обечайку. Ее длина и место установки на корпусе пневмоударного механизма выбрана из условия сохранения собственной устойчивости независимо от изменения положения центра тяжести при возвратно-поступательном движении ударника. В результате уменьшается масса конструкции, упрощается разгрузка извлекаемого грунтового керна и улучшается отклик системы на управляющие усилия со стороны тягового органа в ходе ее перемещения по скважине (рис. 3). Вместе с тем одним из главных недостатков такой компоновки грунтотходчика является ограничение на величину разработки забоя за рабочий цикл, поскольку перепущенный через цилиндрическую обечайку и поперечные ребра грунт при его чрезмерном количестве может создавать анкерный эффект в ходе вытягивания устройства в прямом для дальнейшей разгрузки. Как показали эксперименты на физической модели, предельный объем извлекаемого керна не может превышать трех диаметров скважины [9].

## Результаты

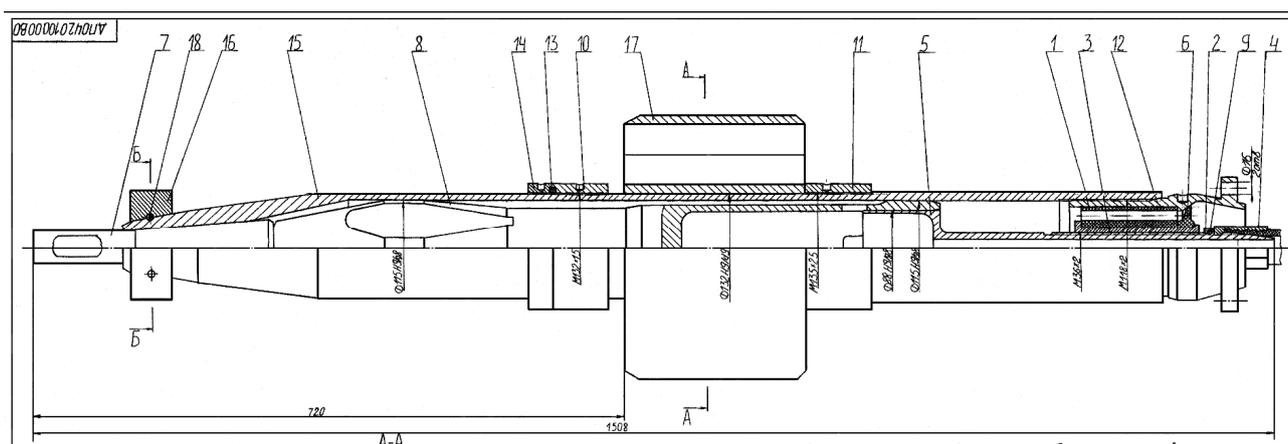


Рис. 5. Общий вид грунтопроходчика с перепускным рабочим органом

Исходя из краткой оценки свойств приведенных выше вариантов компоновки грунтопроходчика, в качестве рабочей была принята схема, обеспечивающая разработку забоя с перепуском грунта через обечайку. Натурный образец устройства для образования каналов диаметром 325, 370, 426 мм выполнен на базе пневмопробойника ИП4603А, обладающего достаточной энергией удара 220 Дж при частоте 6,2 Гц [12]. Конструкция базового привода подверглась минимальным изменениям и доработкам, связанным в основном с размещением на его корпусе рабочего органа и наличием мест крепления тяговых канатов (рис. 5). Для этого в центре корпуса выполнена наружная проточка с метрической резьбой для навинчивания передней и задней упорных гаек. Сменный рабочий орган состоит из внутренней втулки с приваренными четырьмя поперечными ребрами и наружной обечайки с коническим формователем стенок скважины. Задняя гайка с патрубком и передняя наковальня дополнительно имеют места для запасовки подающего и извлекающего канатов тягового механизма.

На основе грунтопроходческого устройства, разрабатывающего забой с перепуском грунта, создан опытный образец комплекса для бестраншейного сооружения горизонтальных и наклонных подземных каналов различного назначения.

### Выводы

1. Предложен один из способов циклической проходки скважин в породном массиве с частичным уплотнением и экскавацией грунта.

2. Рассмотрены различные варианты взаиморасположения узлов проходческого устройства, исходя из чего выбрана наиболее оптимальная схема компоновки с соосным размещением импульсного механизма и рабочего органа перепускного типа.

3. На базе серийного пневмопробойника ИП4603А разработан и изготовлен опытный натурный образец грунтопроходчика для образования скважин диаметром 325, 370, 426 мм различного назначения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нестле Х. Справочник строителя: Строительная техника, конструкции и технологии / Нестле Х. – М.: Техносфера, 2007. – 378 с.
2. Кюн Г. Закрытая прокладка непроходных трубопроводов / Г. Кюн, Л. Шойбле, Х. Шлик. – М.: Стройиздат, 1993. – 168 с.
3. Костылев А. Д. Пневмопробойники в строительном производстве / А. Д. Костылев, В. А. Григоращенко, В. А. Козлов, В. П. Гилета, Ю. Б. Рейфисов. – Новосибирск: Наука, 1987. – 142 с.
4. Кершенбаум Н. Я. Прокладка горизонтальных и вертикальных скважин ударным способом / Н. Я. Кершенбаум, В. И. Минаев. – М.: Недра, 1984. – 245 с.
5. Ткач Х. Б. О работе пневматического поршневого привода с выхлопом в среду с давлением большим атмосферного / Х. Б. Ткач // ФТПРПИ. – 1996 - № 6. С. 34 – 42.
6. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий / А. П. Рыбаков. – М.: Пресс Бюро, № 1. 2005.
7. Данилов Б. Б. Повышение эффективности бестраншейных способов подземного строительства за счет применения пневмотранспорта / Б. Б. Данилов // ФТПРПИ. – 2006 - № 6. С. 75 – 86.
8. Патент 2181816 РФ. Гилета В. П., Смоляницкий Б. Н., Леонов И. П., Тищенко И. В. Способ образования скважин в грунте и пневмоударное устройство для его осуществления. – Оpubл. в БИ, 2002, № 12.
9. Тищенко И. В. Комбинированная проходка скважин в грунте ударными устройствами с кольцевым инструментом / И. В. Тищенко, Б. Н. Смоляницкий, В. П. Гилета // ФТПРПИ. – 2014 - № 3. С. 87 – 97.
10. Тищенко И. В. Определение основных параметров грунтопроходчика с пневмоударным приводом кольцевого рабочего органа / И. В. Тищенко, Б. Н. Смоляницкий // ФТПРПИ. – 2007 - № 5. С. 41 – 51.
11. Воронцов Д. С. Проходка скважин в грунте ударным устройством с кольцевым инструментом / Д. С. Воронцов, А. М. Петреев, Б. Н. Смоляницкий // ФТПРПИ. – 2005 - № 2. С. 53 – 58.
12. Гурков К. С. Пневмопробойники / К. С. Гурков, В. В. Климашко, А. Д. Костылев, В. Д. Плавских, Е. П. Русин, Б. Н. Смоляницкий, К. К. Тупицын, Н. П. Чепурной. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990. – 215 с.

© И. В. Тищенко 2024

*А. В. Азаров<sup>1\*</sup>, С. В. Сердюков<sup>1</sup>*

## **Исследование траекторий трещин гидроразрыва пласта вблизи полости в условиях неоднородного сжатия**

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\*e-mail: antonazv@mail.ru

**Аннотация.** В работе изучаются закономерности распространения трещины гидроразрыва пласта вблизи цилиндрической полости в упругой однородной среде, которая находится в условиях неоднородного всестороннего сжатия. Исследования проводятся на основе численных экспериментов. Для моделирования распространения трещины гидроразрыва при закачивании в неё жидкости используется расширенный метод конечных элементов, реализованный в программном пакете Abaqus. Рассматриваются различные напряженные состояния среды при сохранении соотношения между главными напряжениями сжатия 1:1.5:2, а также различные положения начальной трещины. Приводятся, сравниваются и анализируются формы трещин, полученные в результате проведения численных экспериментов. Показаны случаи, когда гидроразрыв будет захватываться полостью и распространяться вдоль неё, когда будет выходить на её поверхность, а когда удаляться от неё.

**Ключевые слова:** гидравлический разрыв, рост трещины, гидроразрыв вблизи полости, расширенный метод конечных элементов, численный эксперимент

*A. V. Azarov<sup>1\*</sup>, S. V. Serdyukov*

## **Study of trajectories of hydraulic fracturing cracks near a cavity under conditions of non-uniform compression**

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\* e-mail: antonazv@mail.ru

**Abstract.** The paper studies the propagation of a hydraulic fracturing crack near a cylindrical cavity in an elastic homogeneous medium, which is under conditions of non-uniform uniform compression. Research is carried out on the basis of numerical experiments. To simulate the propagation of a hydraulic fracturing crack when fluid is pumped into it, an extended finite element method is used, implemented in the Abaqus software package. The article considers various stressed states of the medium when the ratio between the principal compression stresses is 1:1.5:2. Additionally, different positions of the initial crack are considered. The crack shapes obtained as a result of numerical experiments are presented, compared and analyzed. Cases are shown when hydraulic fracturing will be captured by a cavity and will propagate along it, when it will reach its surface, and when it will move away from it.

**Keywords:** hydraulic fracturing, crack growth, hydraulic fracturing near a cavity, extended finite element method, numerical experiment

## Введение

Гидроразрыв пласта (ГРП) является одной из популярных технологий, которая используется при добыче полезных ископаемых для решения таких задач как, интенсификация добычи нефти или газа [1], разупрочнения кровли горных пород [2,3], измерения напряженного состояния среды [4], дегазации угольных пластов [5]. Понимание основных закономерностей распространения трещин гидроразрыва может помочь повысить эффективность этой технологии. На сегодняшний день, существуют множество работ, в которых показано, что на ГРП оказывает влияние физические параметры среды и её строение, свойства закачиваемой жидкости и режим её закачки, напряженное состояние среды и т.д. Меньше работ посвящено изучению особенностей распространения гидроразрыва вблизи полостей. Тем не менее, такие условия могут возникать, например, при использовании ГРП в шахтных условиях.

Вопросы распространения гидроразрыва вблизи полостей в существующих работах изучались в основном численными методами. При этом в них часто рассматривались двумерные модели с полостями круговой [6-13] или прямоугольной [14] формой. Реже встречаются исследования, где используются трехмерные модели [15-18].

В данной работе изучаются закономерности развития трещин ГРП вблизи цилиндрической полости в условии неоднородного поле напряжений в среде. Данная работа является продолжением исследований [19] и направлена на изучение основных форм трещин, которые могут получиться вблизи полости при соотношении между главными напряжениями сжатия в среде 1:1.5:2.

## Численные эксперименты

Рассмотрим цилиндрическую полость радиуса  $R$  и расположенную вблизи неё на расстоянии  $d$  начальную трещину (рис.1).

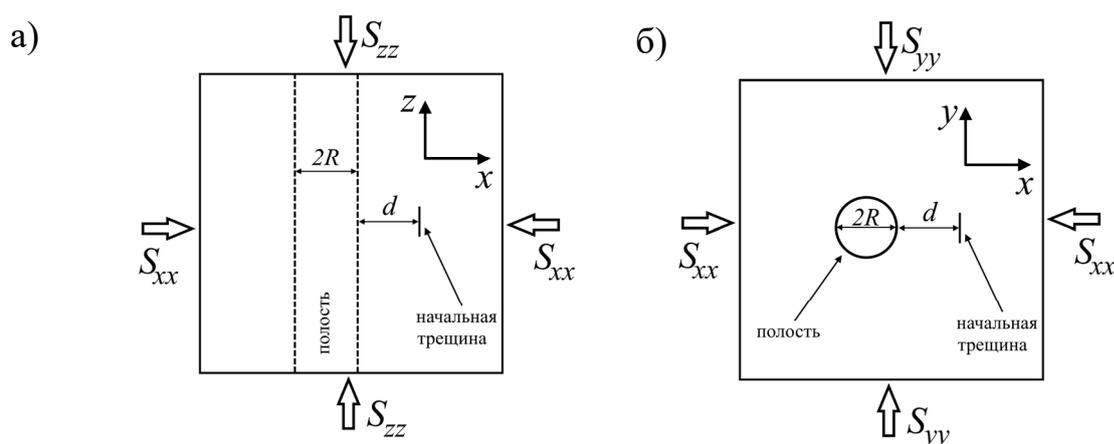


Рис. 1. Расчетная модель, содержащая цилиндрическую полость и начальную трещину гидроразрыва в плоскости  $xz$  и  $xу$ .

Среда является однородной, упругой и находится в условиях неоднородного всестороннего сжатия. Соотношения между напряжения сжатия  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{zz}$  напряжений 1:1.5:2. При численных экспериментах будем сохранять это соотношение, но менять направление действия максимального и минимального напряжения. Моделирование распространения трещины будем проводить в квазистатическом приближении с использованием расширенного метода конечных элементов (XFEM) [20, 21]. Подробная методика описана в работах [8].

При численных экспериментах использовались следующие параметры упругой среды и жидкости разрыва: модуль упругости – 3.0 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.3, прочность материала на растяжение – 1 МПа, критическая энергия разрушения 120 Н/м, динамическая вязкость жидкости 0.001 Па·с. Напряжение в среде и позицию начальной трещины будем изменять в численных экспериментах.

Вначале рассмотрим случай, когда минимальным является вертикальное напряжение  $S_{yy}$ . На рисунке 2 приведены пересечения полученных трещин с вертикальной плоскостью  $z=5$  метров (она является в данном случае плоскостью симметрии).

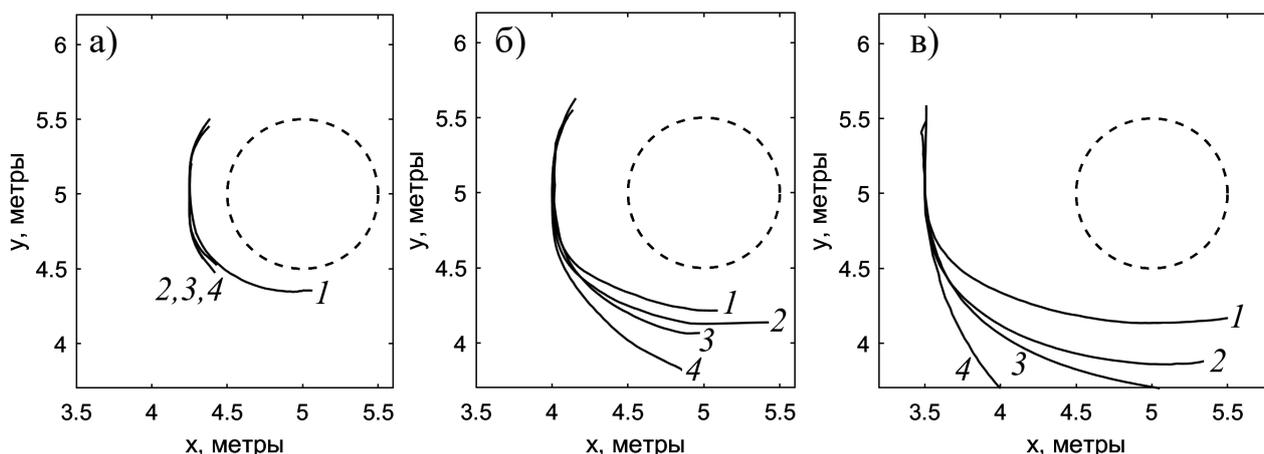


Рис. 2. Пересечения трещин с плоскостью  $z=5$  метров при различном напряжённом состоянии и удалении начальной трещины от полости на расстоянии а)  $0.5R$ , б)  $R$ , в)  $2R$ . Номера кривых обозначены различные напряженные состояния: 1 –  $S_{xx}=6$ ,  $S_{yy}=3$ ,  $S_{zz}=4.5$ ; 2 –  $S_{xx}=4.5$ ,  $S_{yy}=3$ ,  $S_{zz}=6$ ; 3 –  $S_{xx}=0.5$ ,  $S_{yy}=0.25$ ,  $S_{zz}=0.375$ ; 4 –  $S_{xx}=0.375$ ,  $S_{yy}=0.25$ ,  $S_{zz}=0.5$  МПа

Здесь рассматривалось 4 варианта напряженного состояния:

- 1) высокий уровень напряжений, максимальное напряжение действует перпендикулярно оси полости (кривая 1,  $S_{xx}=6$ ,  $S_{yy}=3$ ,  $S_{zz}=4.5$  МПа);
- 2) высокий уровень напряжений, максимальное напряжение действует вдоль полости (кривая 2,  $S_{xx}=4.5$ ,  $S_{yy}=3$ ,  $S_{zz}=6$  МПа);
- 3) низкий уровень напряжений, максимальное напряжение действует перпендикулярно оси полости (кривая 3,  $S_{xx}=0.5$ ,  $S_{yy}=0.25$ ,  $S_{zz}=0.375$  МПа);

4) низкий уровень напряжений, максимальное напряжение действует вдоль полости (кривая 4,  $S_{xx}=0.5$ ,  $S_{yy}=0.25$ ,  $S_{zz}=0.375$  МПа).

Как видно, при расположении начальной трещины на расстоянии половины радиуса (рис. 2а), гидроразрыв переориентировался в горизонтальную плоскость только при высоком уровне напряжений, когда максимальным являлось  $S_{xx}$ . Во всех остальных случаях трещина распространялась вдоль полости. При  $d=R$ , в процессе роста трещина переориентировалась, сближалась с полостью и после некоторого момента времени распространялась вдоль неё (рис. 2б). При  $d=2R$  подобное поведение наблюдалось только для высокого уровня напряжений (рис. 2в, кривые 1 и 2). При низком уровне напряжений трещины при распространении не сближались с полостью и при распространении удалялись от неё (рис. 2в, кривые 3 и 4).

На рисунках 3 приведены различные формы трещин, которые получались в ходе численных экспериментов.

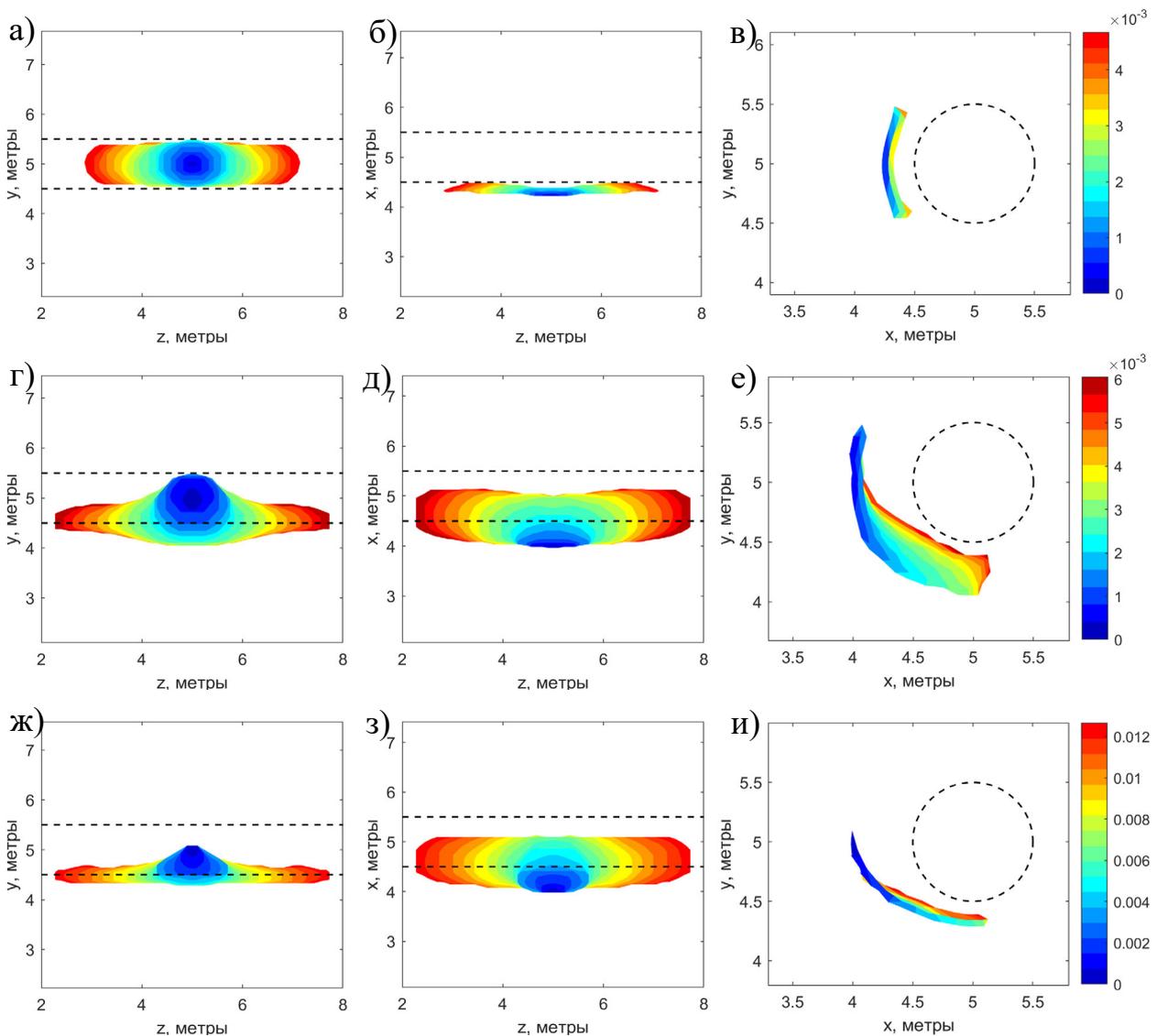


Рис. 3. Проекция трещин на различные плоскости при различном напряженном состоянии: а), г) на  $yz$ ; б), д) на  $xz$ ; в), е) на  $xy$ . На рисунках а), б), в)  $d=R/2$ , напряжение  $S_{xx}=4.5$ ,  $S_{yy}=3$ ,  $S_{zz}=6$  МПа; г), д), е)  $d=R$ , напряжение  $S_{xx}=0.5$ ,  $S_{yy}=0.25$ ,  $S_{zz}=0.375$  МПа; ж), з), и)  $d=2R$ ,  $S_{xx}=6$ ,  $S_{yy}=3$ ,  $S_{zz}=4.5$  МПа

На рис. 3а, 3б, 3в показаны проекции гидроразрыва при  $d=R/2$  и  $S_{xx}=4.5$ ,  $S_{yy}=3$ ,  $S_{zz}=6$  МПа. В этом случае трещина развивается вдоль полости. Подобные формы наблюдались для кривых 2, 3, 4 из рисунка 2а. На рис. 3г, 3д, 3е показаны проекции при  $d=R$  и напряжениях  $S_{xx}=0.5$ ,  $S_{yy}=0.25$ ,  $S_{zz}=0.375$  МПа. В данном случае, гидроразрыв при переориентации начал развиваться вдоль полости. При этом из-за низкого уровня напряжений расстояние между трещиной и полостью уменьшалось (в итоге трещина практически вышла на поверхность полости). При высоких уровнях напряжений, гидроразрыв после того, как попадал в область влияния полости, распространялся вдоль неё, не сближаясь (рис. 3ж, 3з, 3и).

В заключении рассмотрим примеры, когда вертикальное напряжение является максимальным. На рисунке 4 приведены пересечения трещин с горизонтальной плоскостью  $y=5$  метров при различном напряжённом состоянии и различном удалении начальной трещины от полости на расстоянии. Так же, как и в предыдущих примерах рассматривалось 4 варианта ориентации напряжений:

- 1) высокий уровень напряжений, минимальное напряжение действует перпендикулярно оси полости (кривая 1,  $S_{xx}=3$ ,  $S_{yy}=6$ ,  $S_{zz}=4.5$  МПа);
- 2) высокий уровень напряжений, минимальное напряжение действует вдоль полости (кривая 4,  $S_{xx}=4.5$ ,  $S_{yy}=6$ ,  $S_{zz}=3$  МПа);
- 3) низкий уровень напряжений, минимальное напряжение действует максимальное напряжение действует перпендикулярно оси полости (кривая 2,  $S_{xx}=0.25$ ,  $S_{yy}=0.5$ ,  $S_{zz}=0.375$  МПа);
- 4) низкий уровень напряжений, минимальное напряжение действует вдоль полости (кривая 3,  $S_{xx}=0.375$ ,  $S_{yy}=0.5$ ,  $S_{zz}=0.25$  МПа).

Как видно, при  $d=R/2$  кривые различаются не значительно, трещины при развитии распространялись вдоль полости сближаясь с ней (рис. 4а). При  $d=R$ , когда минимальное напряжение действует вдоль оси полости, происходит сближение разрыва и полости (рис. 4б, кривые 3,4). Причем уровень напряжений не значительно повлиял на траектории.

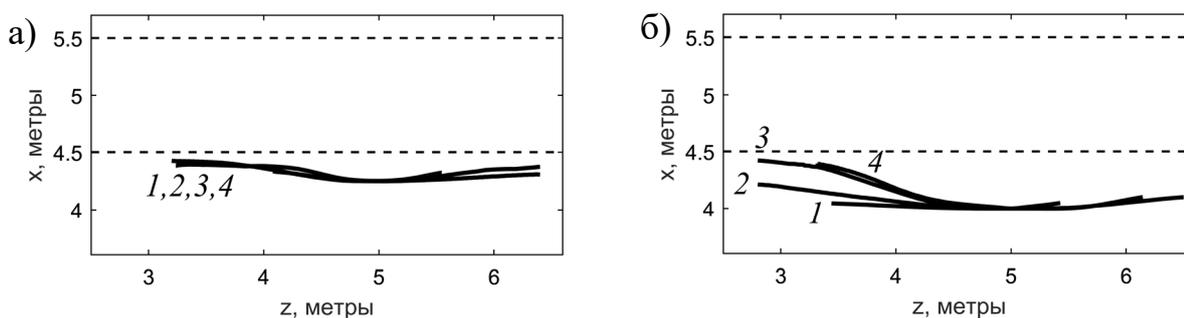


Рис. 4. Пересечения трещин с плоскостью  $y=5$  метров при различном напряжённом состоянии и удалении начальной трещины от полости на расстоянии а)  $R/2$ , б)  $R$ . Номерами кривых обозначены различные напряженные состояния: 1 –  $S_{xx}=3$ ,  $S_{yy}=6$ ,  $S_{zz}=4.5$ ; 2 –  $S_{xx}=0.25$ ,  $S_{yy}=0.5$ ,  $S_{zz}=0.375$ ; 3 –  $S_{xx}=0.375$ ,  $S_{yy}=0.5$ ,  $S_{zz}=0.25$ ; 4 –  $S_{xx}=4.5$ ,  $S_{yy}=6$ ,  $S_{zz}=3$  МПа.

Также сближение полости и трещины наблюдалось при низком уровне напряжений, когда минимальным являлось  $S_{xx}$  (рис. 4б, кривые 2). При высоком уровне напряжений и минимальном  $S_{xx}$ , влияние полости на трещину было незначительным, форма была схожа с дисковой. На рисунке 5а приведена проекция разрыва в этом случае. На рис. 5б дана проекция трещины при  $d=R$  и  $S_{xx}=4.5$ ,  $S_{yy}=6$ ,  $S_{zz}=3$  МПа. Подобные формы наблюдались, когда начальные трещины располагались на расстоянии  $d=R/2$  от полости и когда минимальное напряжение действовало вдоль оси полости. Во втором случае разрывы выходили на поверхность полости.

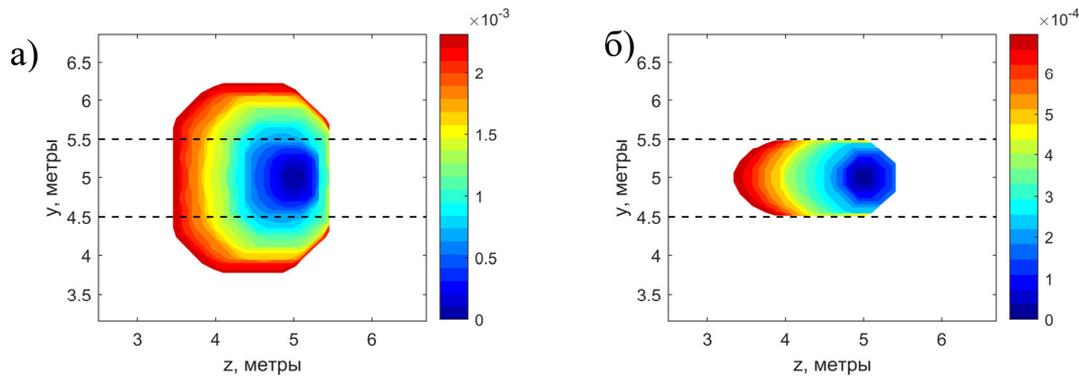


Рис. 5. Проекция трещин на плоскость  $uz$  при различном напряженном состоянии: а)  $S_{xx}=3$ ,  $S_{yy}=6$ ,  $S_{zz}=4.5$ ; б)  $S_{xx}=4.5$ ,  $S_{yy}=6$ ,  $S_{zz}=3$  МПа

### Выводы

В работе были исследованы особенности распространения трещин гидроразрыва вблизи цилиндрической полости в условиях неоднородного поля напряжений. Рассматривались случаи, когда соотношения между главными напряжениями в среде было 1:1.5:2, а точка инициации гидроразрыва располагалась в горизонтальной плоскости, проходящей через ось полости. Показано, что:

1. Если вертикальное напряжение минимально и расстояние между точкой инициации и полостью больше одного её радиуса, то при развитии трещина начинает переориентироваться в горизонтальное направление и возможен «захват» разрыва полостью, в результате которого он начинает распространяться вдоль неё. Чем выше уровень напряжений, тем вероятнее гидроразрыв попадет в область влияния полости и будет распространяться вдоль неё.

2. Если вертикальное напряжение максимально, то трещина гидроразрыва будет развиваться вдоль полости или равномерно во всех направлениях (иметь дисковую форму). Вторым случаем достигается, когда минимальным является напряжение, действующее по нормали к оси полости. При низком уровне напряжений или когда минимальное напряжение направлено вдоль оси полости, возможен выход трещины на поверхность полости.

3. При малых расстояниях между полостью и точкой инициации гидроразрыва (половина радиуса полости и меньше), напряженное состояние меньше влияет на траектории трещин.

4. При низком уровне напряжений в среде и близком расположении точки инициации гидроразрыва к полости (расстояние между точкой инициации и полостью меньше её радиуса) возможны выходы трещины на её поверхность.

### *Благодарности*

Исследование выполнено в рамках Госзадания, номер государственной регистрации 121052500138-4 (FWNZ-2021-0001).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boak J., Kleinberg R. Shale gas, tight oil, shale oil and hydraulic fracturing // *Future Energy*. – Elsevier, 2020. – P. 67–95.
2. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // *ФТПРПИ*. – 2014. – № 5. – С. 137–143.
3. Yang, J., Liu, B., Bian, W., Chen, K., Wang, H., Cao, C. Application Cumulative Tensile Explosions for Roof Cutting in Chinese Underground Coal Mines // *Archives of Mining Sciences*. – 2021. – Vol. 66. – №. 3. – P. 421–435.
4. Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // *ФТПРПИ*. – 2016. – №. 6. – С. 6–14.
5. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Темиряева О. А. Дегазация угольного пласта методом поинтервального гидроразрыва и оборудование для его реализации // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 89–92.
6. Liu Z., Lu Q., Sun Y., Tang X., Shao Z., Weng Z. Investigation of the influence of natural cavities on hydraulic fracturing using phase field method // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2019. – Т. 44. – С. 10481-10501.
7. Chen Z., Li X., Dusseault M. W., and Weng L. Effect of excavation stress condition on hydraulic fracture behaviour // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – Т. 226. – С. 106871.
8. Azarov A., Patutin A., Serdyukov S. Hydraulic fracture propagation near the cavity in a poroelastic media // *Applied Sciences*. – 2021. – Т. 11. – №. 22. – С. 11004.
9. Азаров А. В., Сердюков С. В., Патутин А. В. Исследования развития трещины гидроразрыва в пороупругой среде, содержащей полые включения // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2020. — Т. 7. — №. 1. — С. 12–17.
10. Мартынюк П. А., Шер Е. Н. О развитии трещины вблизи кругового отверстия с учетом внешнего поля сжимающих напряжений // *ФТПРПИ*. — 1996. — № 6. — С. 19 – 30.
11. Kao J. et al. Numerical Simulation and Analysis of Cave Penetration by Hydraulic Fractures // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2020. – Т. 570. – №. 2. – С. 022029.
12. Kao J. W. et al. Numerical analysis of the hydraulic fracture communication modes in fracture-cavity reservoirs // *Petroleum Science*. – 2022. – Т. 19. – №. 5. – С. 2227-2239.
13. Chen, Z., Qiu, J., Chen, Q., Li, X., Ma, B., & Huang, X. Influence of multi-perforations hydraulic fracturing on stress and fracture characteristics of hard rock mass under excavation condition // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2022. – Т. 276. – С. 108925.
14. Xia B., Zhang X., Yu B., and Jia J. Weakening effects of hydraulic fracture in hard roof under the influence of stress arch // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2018. – Т. 28. – №. 6. – С. 951-958.
15. Сердюков С. В., Азаров А. В., Рыбалкин Л. А., Патутин А. В. О форме трещин гидроразрыва породного массива в окрестности цилиндрической полости // *ФТПРПИ*. — 2021. — № 6. — С. 72–84.

16. Liu B., Jin Y., Chen M. Influence of vugs in fractured-vuggy carbonate reservoirs on hydraulic fracture propagation based on laboratory experiments //Journal of Structural Geology. – 2019. – Т. 124. – С. 143-150.
17. Kao J., Xu, D., Bian, X., Yin, S., & Jin, Y. Numerical Analysis of Interaction Between Hydraulic Fracture and a 3D Spherical Cave //ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – ARMA, 2022. – С. ARMA-2022-0554.
18. Qiao, J., Tang, X., Hu, M., Rutqvist, J., & Liu, Z. The hydraulic fracturing with multiple influencing factors in carbonate fracture-cavity reservoirs //Computers and Geotechnics. – 2022. – Т. 147. – С. 104773.
19. Азаров А.В., Сердюков С.В. Моделирование гидроразрыва вблизи выработки круглого сечения в условиях трехосного сжатия // ФТПРПИ. – 2023. – №. 5. – С. 55-69.
20. Belytschko T., Chen H., Xu J., Zi G. Dynamic crack propagation based on loss of hyperbolicity and a new discontinuous enrichment // International journal for numerical methods in engineering, 2003, vol. 58, no. 12, pp. 1873 – 1905.
21. Jafari A., Vahab M., Khalili N. Fully coupled XFEM formulation for hydraulic fracturing simulation based on a generalized fluid leak-off model //Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2021. – Т. 373. – С. 113447

© А. В. Азаров, С. В. Сердюков, 2024

*А. В. Азаров<sup>1\*</sup>, С. В. Сердюков<sup>1</sup>*

## **Численное исследование закономерностей изменения давления распространения трещины гидроразрыва при её развитии вблизи полости**

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\*e-mail: antonazv@mail.ru

**Аннотация.** В работе изучаются закономерности изменения давления распространения трещины гидроразрыва при её развитии вблизи цилиндрической полости. Исследования проводятся на основе численных экспериментов. Основные уравнения математической модели, которые описывают процесс распространения гидроразрыва, решаются с помощью метода расширенных конечных элементов, реализованного в программном пакете Abaqus. Рост трещины проводится в квазистатическом приближении. Показано, как давление разрыва зависит от расстояния между начальной трещиной и полостью, от различного уровня напряжении всестороннего сжатия, а также от ориентации начальной трещины в пространстве. Приводятся траектории трещин, которые соответствуют полученным кривым давления. Отдельно рассматривается случай, когда среда находится в условиях неоднородного всестороннего сжатия. Показаны особенности, которые проявляются на кривых давления при переориентации трещины гидроразрыва.

**Ключевые слова:** гидравлический разрыв, рост трещины, гидроразрыв вблизи полости, давление распространения гидроразрыва, расширенный метод конечных элементов, численный эксперимент

*A. V. Azarov<sup>1\*</sup>, S. V. Serdyukov*

## **Numerical study of changes in the propagation pressure of a hydraulic fracturing crack during its growth near a cavity**

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\* e-mail: antonazv@mail.ru

**Abstract.** The paper considers the problem of changing the propagation pressure of a hydraulic fracturing crack as it propagates near a cylindrical cavity. Research is carried out on the basis of numerical experiments. The basic equations of the mathematical model that describe the process of hydraulic fracturing propagation are solved using the extended finite element method (XFEM) implemented in the Abaqus software package. It is shown how fluid pressure depends on the distance between the initial crack and the cavity, on different levels of compression stress, as well as on the orientation of the initial crack in space. The crack trajectories that correspond to the obtained pressure curves are presented. The case of a non-uniform stress state in a medium is considered. The features that appear on the pressure curves during the reorientation of a hydraulic fracturing crack are shown.

**Keywords:** hydraulic fracturing, crack growth, hydraulic fracturing near a cavity, hydraulic fracturing propagation pressure, extended finite element method, numerical experiment

## Введение

Технология гидравлического разрыва пласта (ГРП) активно применяется при добыче полезных ископаемых. В нефтегазовой отрасли она используется для увеличения добычи нефти и газа [1], в горнодобывающей промышленности для разупрочнения кровли горной породы [2,3], дегазации угольных пластов [4], а также для определения напряженного состояния среды [5].

При гидроразрыве пласта жидкость под высоким давлением закачивается горную породу, что приводит к образованию трещин. Контроль этого процесса является важной задачей, так как её решение может позволить повысить эффективность данной технологии. Одним из параметров, который, как правило, измеряется при гидроразрыве является давление закачиваемой жидкости. Известно, что оно зависит от геометрии создаваемых трещин, напряженном состоянии, свойств среды и т.д. Поэтому анализ давления закачиваемой жидкости в процессе выполнения ГРП может дать некоторую информацию о перечисленных характеристиках.

Ранее в [6-11] изучались некоторые аспекты связанные с давлением распространения трещин при различных условиях. Но в большинстве работ рассматривались однородные среды без каких-либо особенностей. В данной статье исследуются закономерности изменения давления распространения трещины гидроразрыва при её развитии вблизи цилиндрической полости.

## Численные эксперименты

Рассмотрим цилиндрическую полость радиуса  $R$  и начальную трещину, расположенную от неё на расстоянии  $d$  и имеющую наклон на угол  $\alpha$ , который отсчитывается от оси полости (рис. 1). Будем считать, что среда является однородной, упругой. Процесс моделирования распространения трещины ГРП в такой среде будем проводить на основе численного метода расширенных конечных элементов (XFEM) [12,13]. Подробная методика такого подхода описана в работах [14,15].

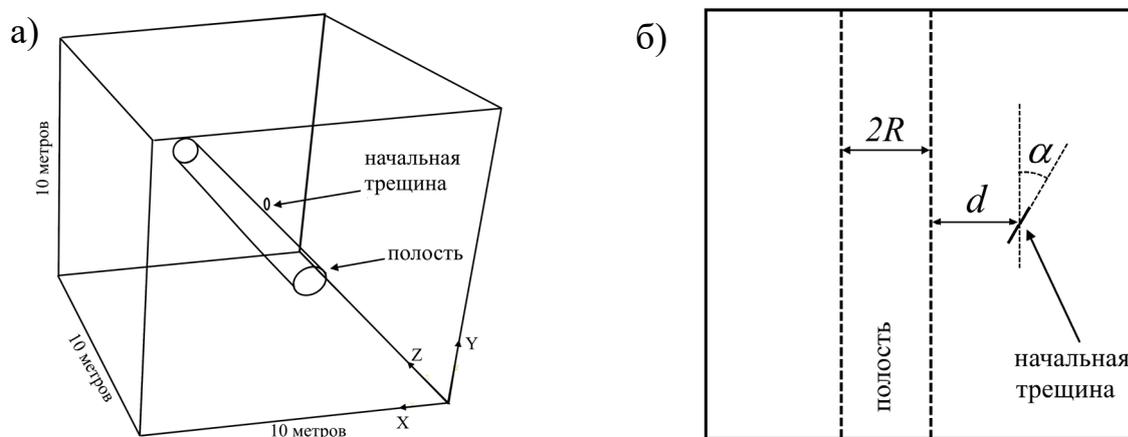


Рис. 1. Расчетная модель, содержащая цилиндрическую полость и начальную трещину. а) трехмерный вид; б) срез в горизонтальной плоскости  $z=5$  метров.

Выберем следующие базовые параметры модели: модуль упругости – 3.0 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.3, критическое напряжение на растяжение – 1 МПа, критическая энергия разрушения 120 Н/м, динамическая вязкость жидкости 0.001 Па·с, скорость закачки – 0.002 м<sup>3</sup>/с. Напряжение в среде, позицию и ориентацию начальной трещины будем изменять в численных экспериментах.

В первом примере рассмотрим случай, когда среда находится в условиях однородного всестороннего сжатия в среде и ориентации начальной трещины параллельно полости (угол  $\alpha$  равен нулю). Уменьшение расстояния между полостью и начальной трещиной приводит к снижению давления распространения трещины (рис. 2а). Это происходит вследствие двух механизмов. Первый связан с увеличением податливости материала в области между разрывом и полостью. Второй связан с разгрузкой материала. Вблизи полости радиальные напряжения по своим значениям меньше, чем напряжения всестороннего сжатия на бесконечности. Из-за этого трещина распространяется перпендикулярно радиальному направлению и на её поверхность действуют меньшие по значениям нормальные напряжения, что в итоге приводит к снижению давления разрыва.

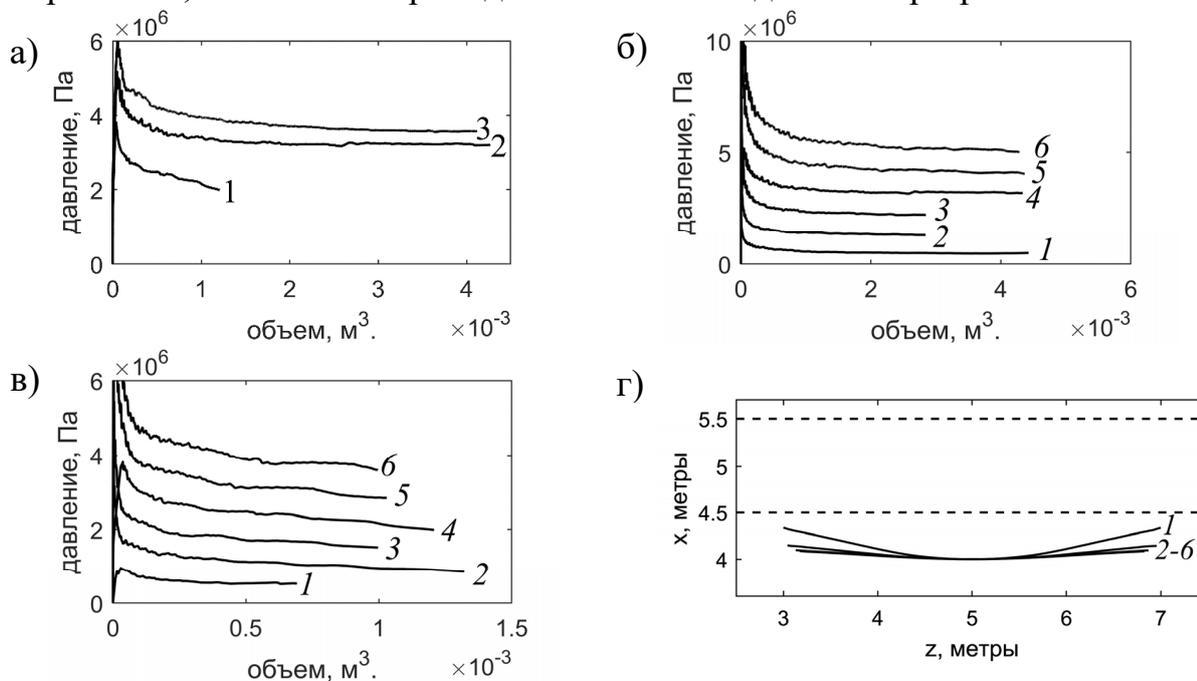


Рис. 2. Давление распространения и траектории трещин гидроразрыва при различной позиции начальной трещины и уровне напряжений всестороннего сжатия в среде: а) давление распространения трещины гидроразрыва в условиях сжатия среды в 3 МПа при различном расстоянии начальной трещины от полости: 1 –  $d=R/2$ ; 2 –  $d=R$ ; 3 –  $d=2R$ ; б) и в) давление разрыва при  $d=R$  и  $d=R/2$  при различном уровне гидростатического напряжения сжатия: 1 – 0 МПа; 2 – 1 МПа; 3 – 2 МПа; 4 – 3 МПа; 5 – 4 МПа; 6 – 5 МПа; г) траектории трещин различного уровня при различном уровне гидростатического напряжения сжатия и  $d=R$ .

При фиксированном расстоянии между полостью и начальной трещиной, увеличение напряжений сжатия в среде приводит к увеличению давления разрыва (рис. 2б, 3в). Это ожидаемый результат, так как нормальное давление на поверхности трещины становится больше. Зависимость между напряжениями всестороннего сжатия и давлением разрыва линейная. Но при  $d=R/2$  увеличение всестороннего сжатия на 1 МПа, приводило к повышению давления разрыва в среднем на 0.68 МПа, а при  $d=R$  на 1 МПа (рис. 2б, 2в). Т.е. для  $d=R$  наблюдается зависимость схожая со случаем распространением трещины в однородной среде без полости.

Повышение напряжения всестороннего сжатия с 1 до 5 МПа не приводило к существенному изменению траекторий трещин, несмотря на то что давления распространения повышались. На рис. 2г изображены пересечения разрывов с плоскостью  $y=5$  метров. Проекция на плоскости  $yz$  и  $xz$  также были схожи. Отличался только результат для модели, где в среде отсутствовали напряжения. В этом случае трещина ГРП развивается в сторону полости (кривая 1 из рис. 2г).

Рассмотрим случай, когда начальная трещина ориентирована не параллельно полости, а под некоторым углом  $\alpha$  к её оси (рис.1б). На рисунке 3а приведены кривые давления при однородном сжатии среды в 3 МПа, расстоянии  $d=R$ . В начальные моменты времени, большие значения угла альфа, приводят к более высоким значениям давления разрыва. Это связано с тем, при ненулевом альфа начальная трещина ориентирована не перпендикулярно минимальному напряжению (из-за разгрузки среды минимальным является радиальное). Далее трещина при распространении сближается с полостью и переориентируется параллельно ей. При этом, чем больше угол альфа, тем быстрее уменьшается расстояние между полостью и разрывом (рис. 3в), что в свою очередь приводит к более низким значениям давления распространения (рис. 3а). Дополнительно на кривой 3 из рис. 3в точкой А1 показано, где была трещина, в момент перед началом резкого падения давления разрыва, А2 – где была трещины при объеме закаченной жидкости в  $3e-3 \text{ м}^3$ , т.е. в момент, когда скорость падения давления начала снижаться (см. кривую 3 рис. 3а). Сопоставляю два рисунки 3а и 3в, становится понятно, что падение давления связано с переориентацией разрыва в направлении вдоль полости.

При снижении уровня сжимающих напряжений в среде, ориентации трещины играет меньшую роль и на давлении распространения ГРП влияет не значительно. При малых напряжениях угол альфа в основном влияет на траекторию распространения трещины и увеличение угла приводит к выходу трещины на поверхность полости (рис. 3г).

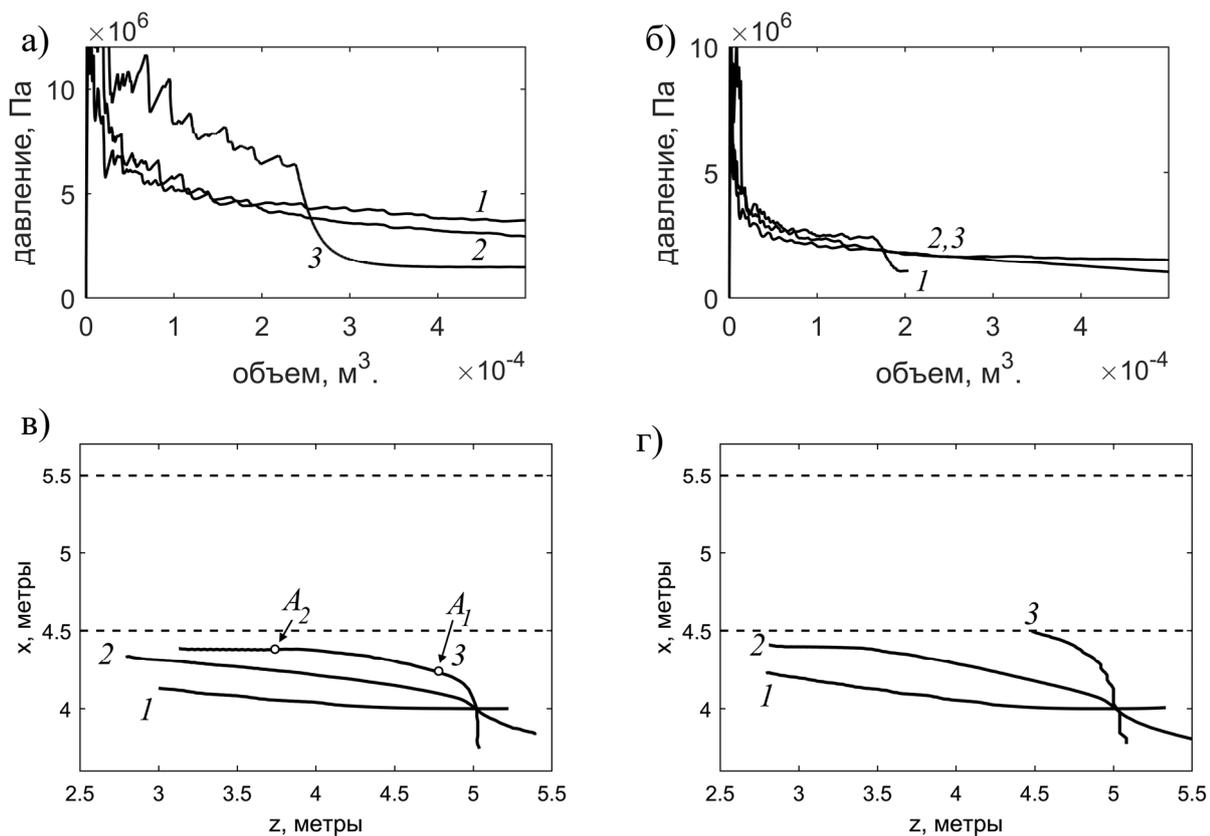


Рис. 3. Давление распространения и траектории трещин при различном угле наклона начальной трещины в условиях гидростатического сжатия среды. а) и б) – давления при гидростатическом сжатии среды в 3 и 1 МПа соответственно. в) и г) – пересечения трещин с горизонтальной плоскостью  $y=5$  м. для гидростатического сжатия среды в 3 МПа и 1 МПа соответственно. Номерами кривых обозначены различные углы наклона начальной трещины: 1 – 0; 2 – 45; 3 – 80 градусов. Расстоянии между начальной трещиной и полостью  $d=R$ .

В заключении рассмотрим пример неоднородного поля напряжений в среде. Рассмотрим самый интересный случай, когда вертикальное напряжение отличается от горизонтальных. В численных экспериментах установим горизонтальные напряжения равными 3 МПа. На рис. 4а изображены кривые давления распространения при вертикальном напряжении равным 1, 2, 3 и 4.5 МПа. Как видно, понижение вертикального напряжения, приводит к снижению давления распространения. Трещина гидроразрыва переориентировались при вертикальных напряжениях равных 1 и 2 МПа (рис. 4б), но особенность в виде резкого падения давления наблюдается только при 1 МПа. На рисунке б точкой  $A_1$  обозначено место, где была трещина, в момент после резкого падения давления разрыва (на кривой давления эта точка обозначена  $Q_1$ ). Как видно, данное падение совпадает с моментом подхода трещины к полости. Также отметим, что если вертикальное напряжение превышает горизонтальные, то напряжение разрыва будет больше (кривые 3 и 4 на рис. а), чем при однородном сжатии среды несмотря на то, что трещина ориентирована не в горизонтальной плоскости.

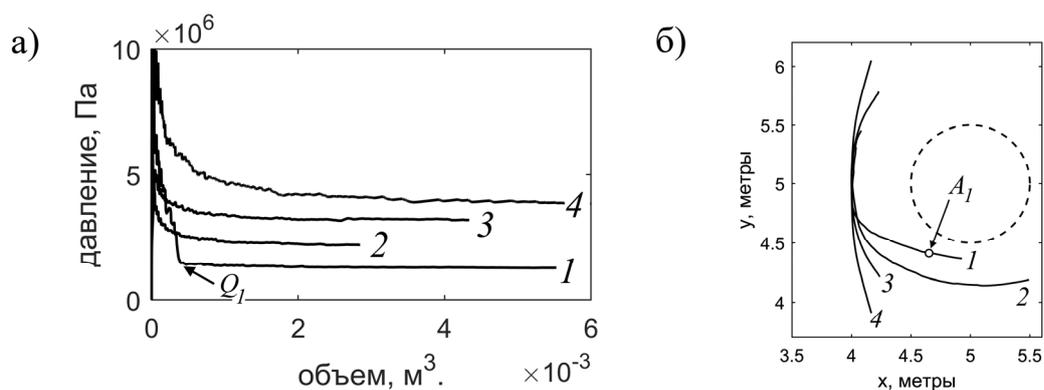


Рис. 4. Давление распространения и траектории трещин гидроразрыва при удалении трещины от полости на расстоянии одно радиуса, горизонтальных напряжениях равных 3 МПа и различном значении вертикальных напряжений.

а) давления распространения; б) пересечения трещин с вертикальной плоскостью  $z=5$  метров. Номерами кривых обозначены используемые значения вертикальных напряжений: 1 – 1 МПа; 2 – 2 МПа; 3 – 3 МПа; 4 – 4.5.

### Выводы

В работе были исследованы особенности изменения давления распространения гидроразрыва вблизи цилиндрической полости. Показано, что:

- уменьшение расстояния между начальной трещиной и полостью ведет к снижению давления разрыва;
- увеличение напряжения всестороннего сжатия приводит к увеличению давления разрыва;
- ориентация трещины влияет на давление распространения (если трещина ориентирована не параллельно стенке полости, то на начальной стадии развития гидроразрыва, давление может оказаться выше, чем в случае параллельной ориентации);
- особенности на кривых давления в виде резкого падения значений наблюдаются, когда трещина достаточно быстро меняет направление развития (например, при сильной анизотропии напряжений сжатия среды).

### Благодарности

Исследование выполнено в рамках Госзадания, номер государственной регистрации 121052500138-4 (FWNZ-2021-0001).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boak J., Kleinberg R. Shale gas, tight oil, shale oil and hydraulic fracturing // Future Energy. – Elsevier, 2020. – P. 67–95.
2. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. – 2014. – № 5. – С. 137–143.
3. Yang, J., Liu, B., Bian, W., Chen, K., Wang, H., Cao, C. Application Cumulative Tensile Explosions for Roof Cutting in Chinese Underground Coal Mines // Archives of Mining Sciences. – 2021. – Vol. 66. – №. 3. – P. 421–435.

4. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Темиряева О. А. Дегазация угольного пласта методом поинтервального гидроразрыва и оборудование для его реализации // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 89–92.
5. Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // *ФТПРПИ.* – 2016. – №. 6. – С. 6–14.
6. Xi X. et al. Modelling the near-wellbore rock fracture tortuosity: Role of casing-cement-rock well system, perforation and in-situ stress // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* – 2022. – Т. 157. – С. 105182.
7. Cheng W., Lu C., Zhou Z. Modeling of borehole hydraulic fracture initiation and propagation with pre-existing cracks using the displacement discontinuity method // *Geotechnical and Geological Engineering.* – 2020. – Т. 38. – С. 2903-2912.
8. Zhang X. et al. Initiation and growth of a hydraulic fracture from a circular wellbore // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* – 2011. – Т. 48. – №. 6. – С. 984-995.
9. McClure M. W. et al. The effect of changing fracture compliance on pressure transient behavior during diagnostic fracture injection tests // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?*. – SPE, 2014. – С. SPE-170956-MS.
10. Jeffrey R. G. et al. Measurement and analysis of full-scale hydraulic fracture initiation and reorientation // *Rock Mechanics and Rock Engineering.* – 2015. – Т. 48. – С. 2497-2512.
11. Cheng Y. et al. Experimental and numerical studies on hydraulic fracturing characteristics with different injection flow rates in granite geothermal reservoir // *Energy Science & Engineering.* – 2021. – Т. 9. – №. 1. – С. 142-168.
12. Belytschko T., Chen H., Xu J., Zi G. Dynamic crack propagation based on loss of hyperbolicity and a new discontinuous enrichment // *International journal for numerical methods in engineering*, 2003, vol. 58, no. 12, pp. 1873 – 1905.
13. Jafari A., Vahab M., Khalili N. Fully coupled XFEM formulation for hydraulic fracturing simulation based on a generalized fluid leak-off model // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* – 2021. – Т. 373. – С. 113447.
14. Azarov A., Patutin A., Serdyukov S. Hydraulic fracture propagation near the cavity in a poroelastic media // *Applied Sciences.* – 2021. – Т. 11. – №. 22. – С. 11004.
15. Serdyukov S. V. et al. Shapes of Hydraulic Fractures in the Neighborhood of Cylindrical Cavity // *Journal of Mining Science.* – 2021. – Т. 57. – №. 6. – С. 943-954.

© А. В. Азаров, С. В. Сердюков, 2024

*С. Е. Алексеев\*, Б. Кубанычбек*

## **Пути повышения ресурса деталей погружного пневмоударника**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск  
Российская Федерация  
\*e-mail: Alex@misd.ru

**Аннотация.** Ударник в погружном пневмоударнике является наиболее нагруженной ударной деталью. От стойкости этой детали во многом зависит и общий ресурс машины. Приведены данные испытаний пневмоударника ПВ130. Произведен анализ его прочности. Для увеличения прочностных характеристик рассматривается выбор высокопрочных сталей и усовершенствование технологии термообработки. Показана возможность изготовления составного ударника, в котором его часть, для ликвидации опасных напряжений, выполнена из синтетического материала малой плотности.

**Ключевые слова:** ударник, напряжение, масса, энергия удара, мощность, термообработка, буровой инструмент

*S. E. Alekseev\*, B. Kubanychbek*

## **Ways of extending life time of parts of down-the-hole air drill hammer**

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia  
\*e-mail: Alex@misd.ru

**Abstract.** The piston of a down-the-hole air drill hammer is the most loaded percussion part. The durability of this part governs the life time of the machine in many ways. The article describes the test data of air drill hammer PV130. The strength of the machine is analyzed. With a view to enhancing the machine strength, a set of high-resistance steels is reviewed, and the improvement of thermal treatment technologies is addressed. The manufacture of a compound piston, with its part made of a synthetic material of low density to eliminate hazardous stresses is illustrated.

**Keywords:** piston, stress, mass, impact energy, capacity, thermal treatment, drilling tool

### ***Введение***

Бурение скважин - важное звено в технологической цепи добычи полезных ископаемых. В середине прошлого века разработана разновидность буровой техники – погружные пневмоударники, располагаемых непосредственно у забоя буримой скважины, что обеспечивает наилучшую передачу энергии удара к забою. Разрабатываются пневмоударники различной конструкции [1].

В ИГД СО РАН разработан погружной пневмоударник с камерой холостого хора, расположенной в середине ударника, между головной и хвостовой его ступенями [2] (рис. 1).

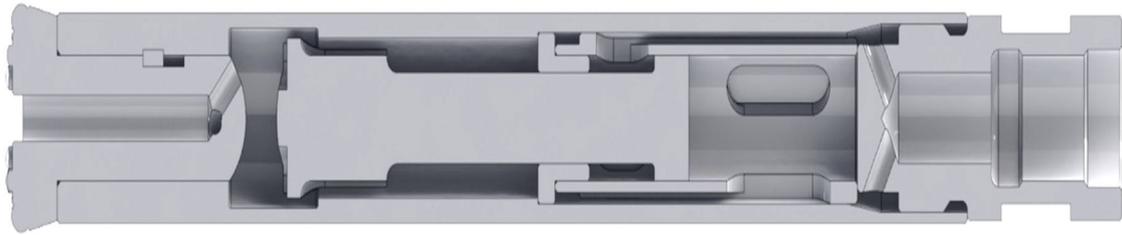


Рис. 1. Схема погружного пневмоударника с расположением камеры холостого хода в средней части ударника.

В отличие от традиционных конструкций, где данная камера располагается у переднего торца ударника, такое расположение позволяет делать камеру у переднего торца ударника камерой атмосферного давления, не требующей герметизации. Это позволяет создавать адаптеры под различный тип бурового инструмента, включая импортный (рис. 2).



Рис. 2. Пневмоударник с импортной коронкой SPEED Ø165 мм

Это расширяет возможность выбора бурового инструмента.

#### ***Объект исследования***

По данной принципиальной схеме был разработан погружной пневмоударник ПВ130 (рис. 3)



Рис. 3. Экспериментальный образец погружного пневмоударника ПВ130

Техническая характеристика

Диаметры скважин, мм	134 – 152
Наружный диаметр корпуса, мм	120
Длина (без коронки) мм	1110
Масса (без коронки) кг	65
Масса ударника, кг	16
Рабочее давление, МПа	1,0 – 2,0 МПа
Энергия удара (при 2,0 МПа), Дж	700
Частота ударов (при 2,0 МПа), с <sup>-1</sup>	26
Ударная мощность (при 2,0 МПа), кВт	19,6
Расход воздуха (при 2,0 МПа), м <sup>3</sup> /мин	24

Преимущество данной схемы заключается еще в том, что ударник не имеет внутренних каналов, что дает возможность повышения прочности и позволяет создавать машины различного диаметра, использовать при работе на повышенном давлении энергоносителя [3,4].

Ударник пневмоударника ПВ130 был изготовлен из отечественной легированной стали 20Х2Н2А по ГОСТ 4543-71.

***Испытания пневмоударника***

На первом этапе работы производились на карьере «Борок» г. Новосибирск, где бурились взрывные скважины диаметром 152 мм глубиной 12 м по гранитам крепостью  $f = 12 \dots 14$  по шкале Протодяконова. Скважины значительно обводнены. Работа осуществлялась на импортном буровом станке повышенного давления ROC L8. Станок оборудован компрессором производительностью 21,2 м<sup>3</sup>/мин на давление 2,0 МПа. Отмечалась скорость бурения не менее зарубежных аналогов. Здесь было пробурено 300 пог. м скважин. В дальнейшем работа проводилась на карьерах Алтая. Бурение производилось с импортной буровой коронкой DHD350 [5].

После проходки в общей сложности 870 пог. м наблюдалась поломка ударника (рис. 4).

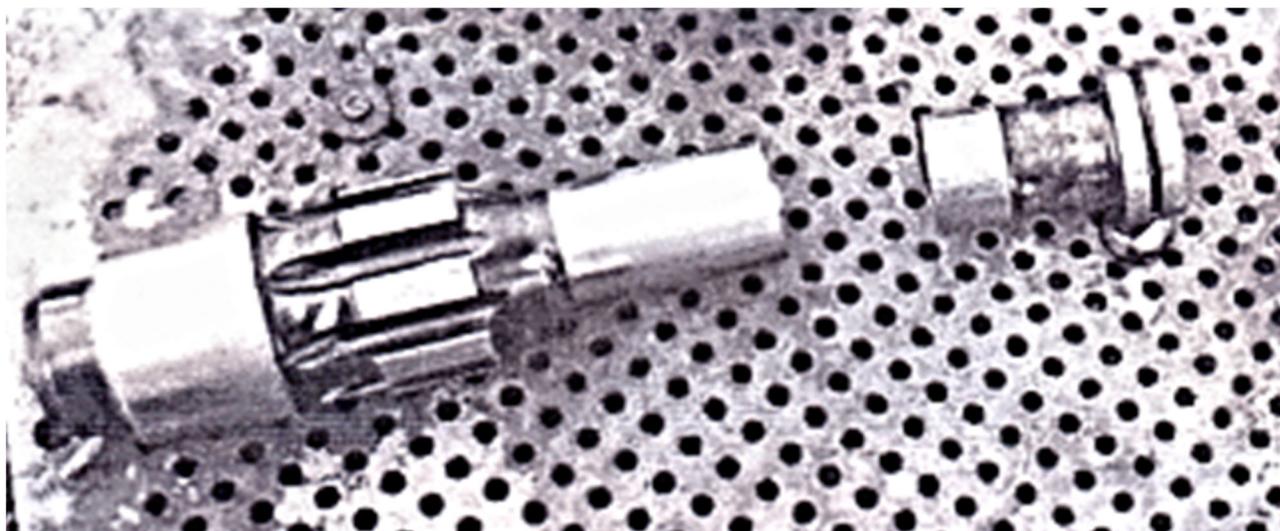


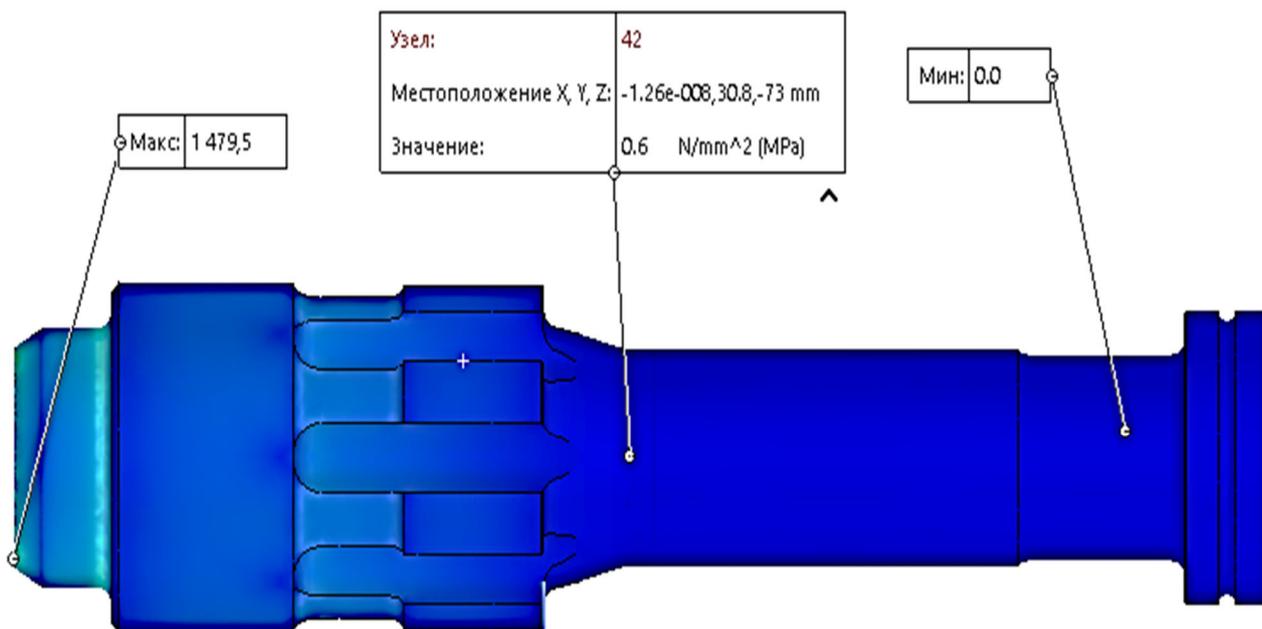
Рис. 4. Поломка ударника

### *Анализ прочности ударника*

При анализе причин поломки было произведено численное моделирование возникновения напряжений в наиболее уязвимых местах ударника [6,7]. Некоторые зависимости представлены на рис. 5.

У передовых моделей пневмоударников с высокими показателями ударной мощности высокий ресурс работы обеспечивается применением новых высокопрочных материалов. Применяемые для изготовления ударников стали должны обладать высокой прочностью, значительным сопротивлением усталостному разрушению и поверхностному выкрашиванию и высокой износостойкостью поверхности. Для изготовления массивных ответственных деталей пневмоударников традиционно используют низкоуглеродистые легированные стали марок 12ХН3А или 12Х2Н4МА, упрочняемые цементацией с последующей закалкой и низким отпуском. Однако прочностные характеристики стали 12ХН3А не обеспечивают надежную работу ударников ударных машин высокого давления. Напряжения в объеме детали будут близки к пределу текучести (600 МПа), что может привести к разрушению стали по механизмам малоциклового усталости.

Предел текучести 785,6 МПа  
 Узел № 42



Название исследования: Испытание на ударную нагрузку 1-(По умолчанию)  
 Тип эпюры: Напряжение1

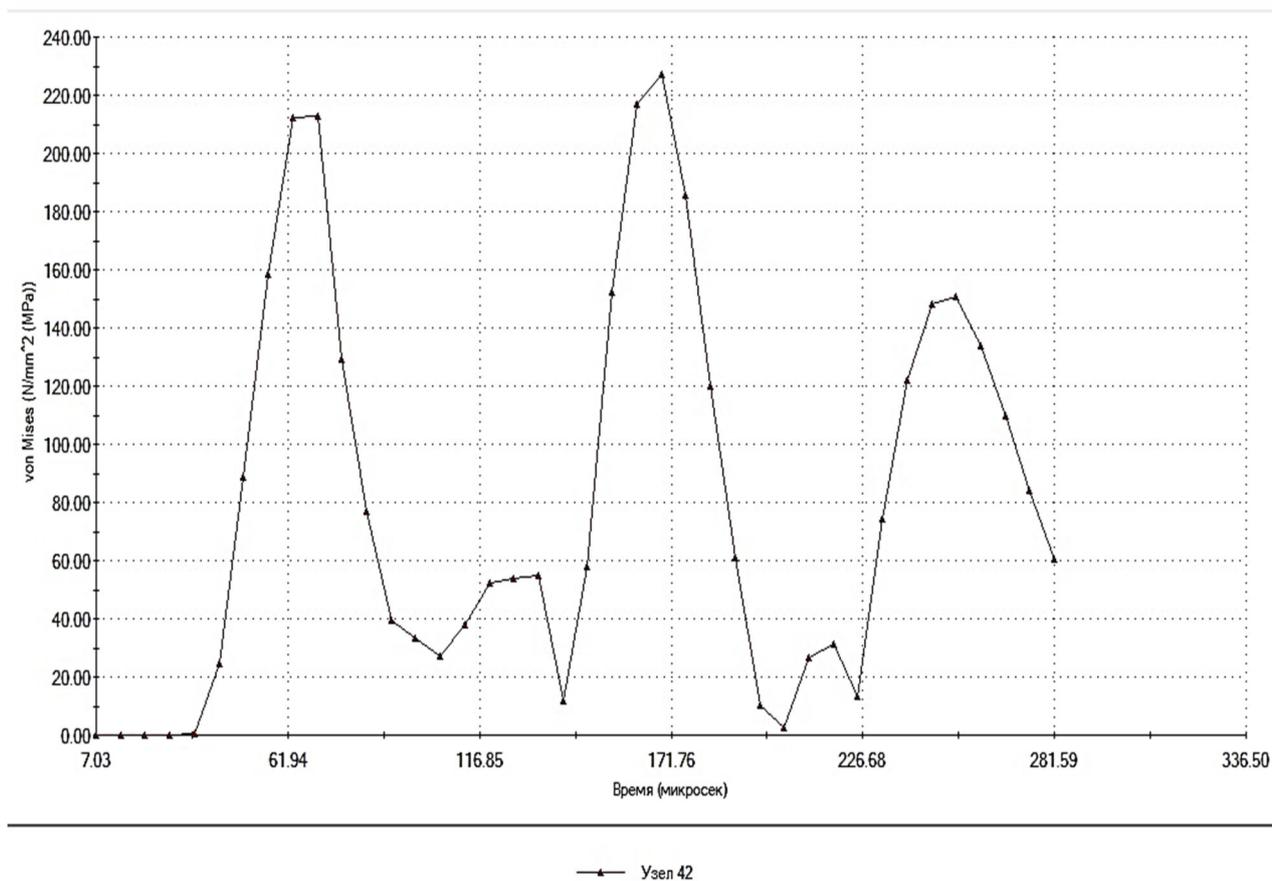


Рис. 5. Напряжения в теле ударника.

### *Пути повышения прочности ударника*

Для изготовления новой модели пневмоударника ПВ130 была использована высококачественная сталь 40Х2Н2МА, термически упрочненная различными способами. В качестве базовой обработки была использована традиционная закалка в масле с последующим отпуском при температуре 400°С. Ряд образцов был упрочнен перспективной термомеханической обработкой со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ), разработанной на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ. Суть обработки заключается в нагреве стали до температуры аустенитизации ее деформировании и охлаждении в расплаве солей. Горячая деформация приводит к измельчению зерен аустенита и способствует формированию мелкодисперсной структуры мартенсита и бейнита. При ВТММБ обработке мартенситное превращение характеризуется своей незавершенностью. Мартенситные кристаллы окружены аустенитом, обеспечивающим релаксацию внутренних напряжений в стали. Кроме того, мартенсит преимущественно образуется в микрообъемах, обедненных углеродом и обладающих повышенной температурой начала мартенситного превращения, что способствует образованию в структуре стали реечного мартенсита, характеризующегося по сравнению с двойникованным повышенной вязкостью разрушения. Принципиальное отличие разработанной технологии от известных технологических процессов высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) и термомеханической изотермической обработки с бейнитным превращением переохлажденного аустенита (ВТМИЗО) заключается в том, что в стали формируется мелкодисперсная смешанная структура, состоящая из нижнего бейнита и продуктов отпуска мартенсита [8-10]. Сталь, обработанная по технологии ВТММБ при сопоставимых показателях прочности, имеет более чем в два раза выше ударную вязкость и в шесть раз выше трещиностойкость по сравнению со сталью, упрочненной по традиционной технологии закалки с отпуском (таблица). Новый технологический процесс целесообразно применять для упрочнения поковок деталей ударных машин, изготавливаемых с использованием технологии горячей объемной штамповки.

## Механические свойства сталей после различных способов термического упрочнения

№	Марка материала	Производитель	Твердость HRC	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	Долговечность, Цикл	Скорость роста трещины при $K=10$ МПа $\sqrt{\sqrt{m}}$ , $10^{-7}$ м/цикл
1	40ХН2МА (закалка и отпуск)	ИГД	45	1267	1444	48	86400	1,5
2	40ХН2МА (ВТММБ)	ИГД	45	895	1302	112	500700	0,2
3	30Х2Н3МА	Atlas Copco	44	1044	1579	89	62400	1

Для изготовления тяжело нагруженных деталей ударных машин целесообразно использовать среднеуглеродистые легированные стали, закаленные и отпущенные до твердости HRC 44...48. Если в цикле производства деталей возможно использование операции горячей объемной штамповки, то наиболее эффективным является технологический процесс высокотемпературной термомеханической обработки с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ) который позволяет обеспечить высокую прочность, ударную вязкость и трещиностойкость получаемых поковок.

Другой путь увеличения прочности состоит в ликвидации причин возникновения поломок – значительных напряжений в части детали. В качестве примера, образец ударника данной конструкции выполнен составным [11,12] (рис. 6). Шейка ударника и хвостовая ступень изготовлена из капролона, головная массивная часть из легированной стали. Физико-механические свойства капролона позволяют легко выдерживать статические нагрузки, возникающие при работе пневмоударника, а в момент удара, ввиду малой инертности и упругости материала, значительных напряжений не возникает. Плотность капролона в 7 раза меньше плотности стали.

Это может быть использовано и для облегчения, в случае необходимости, общей массы ударника при работе на низком давлении энергоносителя.



Рис. 6. Составной ударник

## *Заключение*

Ударник наиболее ответственная ударная деталь пневмоударника. Во многом его стойкость лимитирует ресурс пневмоударника. Однако, это не самая сложная деталь, ее стоимость много меньше стоимости всего пневмоударника, поэтому ударники могут входить в комплект оборудования в качестве запасных частей. Но это не снимает проблему увеличения стойкости ударника.

Для этого могут быть использованы более высокопрочные стали, с усовершенствованной технологией термообработки.

Еще путь повышения стойкости ударника — это ликвидация высоких напряжений в части детали. Для этого ударник может быть выполнен составным, где подверженная поломки шейка ударника и задняя ступень, изготавливается из капролона, имевшего малую плотность.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Медведев И.Ф. Режимы бурения и выбор буровых машин. Москва. Недра. 1968.
2. Патент. РФ № 2090730. Погружной пневматический ударный механизм / С.Е. Алексеев // Оpubл. в БИ – 1997. - № 26.
3. Репин А.А., Смоляницкий Б.Н., Алексеев С.Е., Попелюх А.И., Тимонин В.В., Карпов В.Н.. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ. //ФТПРПИ. – 2014. - № 5.-С.157-167
4. Репин А.А., Алексеев С.Е. Создание пневмоударников для работы на повышенном давлении энергоносителя // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Т. III. Машиноведение. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. –С.61-70.
5. Тимонин В.В., Алексеев С.Е., Кокоулин Д.И. Испытания импортзамещающих погружных пневмоударников высокого давления. / Международная научная конференция ИНТЕРЭКСПО ГЕО – СИБИРЬ – 2019, т 2 № 5, Новосибирск, 2019 С. 57 -66.
6. Шахторин И.О. Доводка машин ударного действия при помощи современного программного обеспечения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017.Т.4. № 1. С. 72-77.
7. Ощепков В.С. Компьютерное моделирование рабочего процесса погружного пневмоударника П-110 // ГИАБ. Москва 2018. № 7. С. 131-138.
8. Репин А. А., Алексеев С. Е., Попелюх А. И. Методы повышения надежности деталей ударных машин -ФТПРПИ. – №4. – 2012- С. 94–101]
9. Попелюх П. А., Никулина А.А., Попелюх. А. И. Влияние внешней среды на показатели надежности деталей горных машин, работающих в условиях динамического сжатия. Научный вестник НГТУ-1013-№ 4(53) С 214-229.
10. Попелюх П. А., Попелюх А. И., Юркевич М. Р. Комбинированная термомеханическая обработка стали с мартенсито-бейнитным превращением аустенита. Обработка металлов. №2 2013.
11. Пат. 2343266 РФ: МПК7 E21B 4/14 Погружной пневмоударник. / А.А. Репин, С.Е. Алексеев, Г.А. Пятнин; ИГД СО РАН. - № 2007124972/03; заявл. 02.07.2007; опубл. 10.01.2009 в Бюл. №1
12. Полезн. модель 121854 РФ. Погружной пневмоударник. / А.А. Репин, С.Е. Алексеев, В.Н. Карпов; ИГД СО РАН. - № 2012118740/03; заяв. 04.05.2012; опубл. 10.11.2012 Бюл. №31.

© С. Е. Алексеев, Б. Кубанычбек, 2024

*Ю. В. Ваназ<sup>1,2</sup>, И. В. Тищенко<sup>1</sup>*

## **Силовое тяговое устройство грунтопроходческого комплекса циклического действия**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
e-mail: yuliya.vanag@corp.nstu.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена техническая задача – создание силового тягового устройства для проходчика горизонтальных скважин комбинированного типа с частичным уплотнением и экскавацией грунта. Приведена краткая характеристика аналогичных устройств с жесткой и гибкой связями между силовыми элементами системы. С учетом специфики данного типа проходческих установок обоснована компоновочная схема и конструкция канатного тягового устройства двустороннего действия с пневматическим приводом исполнительного механизма, развивающего номинальное усилие 32 кН в обоих направлениях движения. Приведены результаты полевых испытаний тягового устройства в составе грунтопроходческого комплекса перепускного типа для образования скважин диаметром 325, 370, 426 мм.

**Ключевые слова:** тяговый орган, грунтопроходчик, скважина, усилие подачи, коррекция траектории, грунтовый керн, пневмопривод

*Yu.V. Vanag<sup>1,2</sup>, I.V. Tishchenko<sup>1</sup>*

## **The traction equipment of a cyclic action tunneling machine**

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia,

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,  
e-mail: yuliya.vanag@corp.nstu.ru

**Abstract.** The article considers the technical problem - creation of combined type tunneling machine for borehole horizontal well sinking with partial compaction and soil excavation. A brief characteristic of similar devices with rigid and flexible links between power elements of the system is given. Taking into account the specifics of this type of tunnelling machines the layout and design of double-end action rope traction device with pneumatic drive of the actuating mechanism, with a nominal force of 32 kN in both directions of movement, are substantiated. The results of field trial of the traction equipment as a part of the tunneling machine for the formation of 325, 370, 426 mm diameter holes are given.

**Keywords:** traction equipment, tunneling machine, hole, force of the power draft unit, trajectory correction, soil core, air-powered drive

### ***Введение***

Проходка горизонтальных и наклонных скважин для последующей прокладки трубопроводов и кабельных линий различного назначения получила

широкое распространение в подземном строительстве. Одна из возможностей дальнейшего повышения эффективности данного технологического направления связана с увеличением интенсивности процесса внедрения инструмента в породный массив за счет создания более благоприятных условий для его разрушения. Таким способом, позволяющим достичь данный устойчивый эффект, является одновременное приложение к погружаемому телу как динамической нагрузки со стороны генератора ударных импульсов, так и статической силы от механизма подачи [1 – 5].

### *Теория*

Для создания необходимого напорного усилия могут применяться исполнительные системы с жесткими связями на основе гидроцилиндров возвратнопоступательного действия [6, 7]. Они обладают значительным потенциалом по силе напора проходчика 1 с расширителем 2 и гибким питающим рукавом 3 на трубу-патрон 4 (рис. 1). При этом ее величина в большинстве случаев ограничивается лишь условием прочности и устойчивости погружаемого элемента. Существенным недостатком таких систем является проявление эффекта гидроудара от силового импульса совместно работающего вибромолота, передаваемого через подвижную клиновую обойму 5 на шток гидроцилиндра 6, что негативно влияет на ресурс гидросистемы. Кроме того, сравнительно короткий рабочий ход требует частых остановок и перехватов трубы-патрона при помощи неподвижной клиновой обоймы 7, объединенной с упорной плитой 8. В силу указанных недостатков, а также необходимостью одновременного использования двух энергоустановок: воздушного компрессора и гидравлической станции, данный способ не нашел широкого применения на практике.

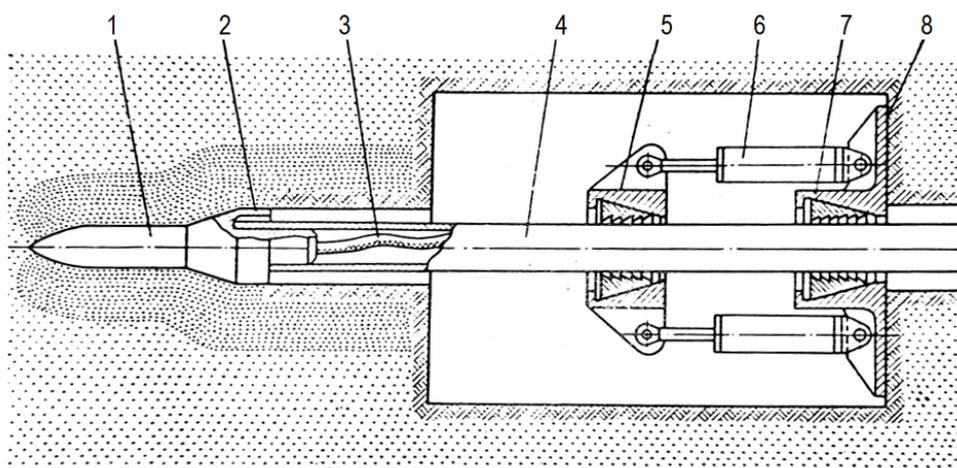


Рис. 1. Схема бестраншейной прокладки трубы-патрона путем формирования горизонтальной скважины забойным проходчиком: 1 – проходчик; 2 – расширитель; 3 – гибкий рукав; 4 – труба-патрон; 5 – подвижная клиновая обойма; 6 – гидроцилиндры подачи; 7 – неподвижная клиновая обойма; 8 – упорная плита

Использование в качестве привода возвратнопоступательного действия более простых и легко адаптируемых пневмоцилиндров неэффективно из-за низкого порогового значения реализуемого усилия подачи.

На рис. 2 изображена система с передней буровой головкой 1, непосредственно разрабатывающей забойную зону [8]. Ее перемещение отслеживается гибкой канатно-блочной системой в виде силового полиспафта 4 требуемой кратности, одна обойма которого закреплена на неподвижном якоре 2. Шнековый транспортер 3 удаляет разработанный грунт за пределы трубы-патрона 5. Необходимое напорное усилие на забой обеспечивается работой тягового исполнительного механизма вращательного действия в виде лебедки 6. Основным недостатком оборудования является его сложность и громоздкость. Кроме того, имеет место ненадежность шнекового транспортера и необходимость дополнительного согласования скорости намотки гибкого каната на барабан лебедки с интенсивностью разработки грунта в лобовой проекции забойной зоны, что при электроприводе механизмов, получающих питание от силовой установки 7 весьма затруднительно. Ввиду указанных недостатков данный комплект оборудования не нашел достаточного объема практического внедрения при строительстве подземных трубопроводов.

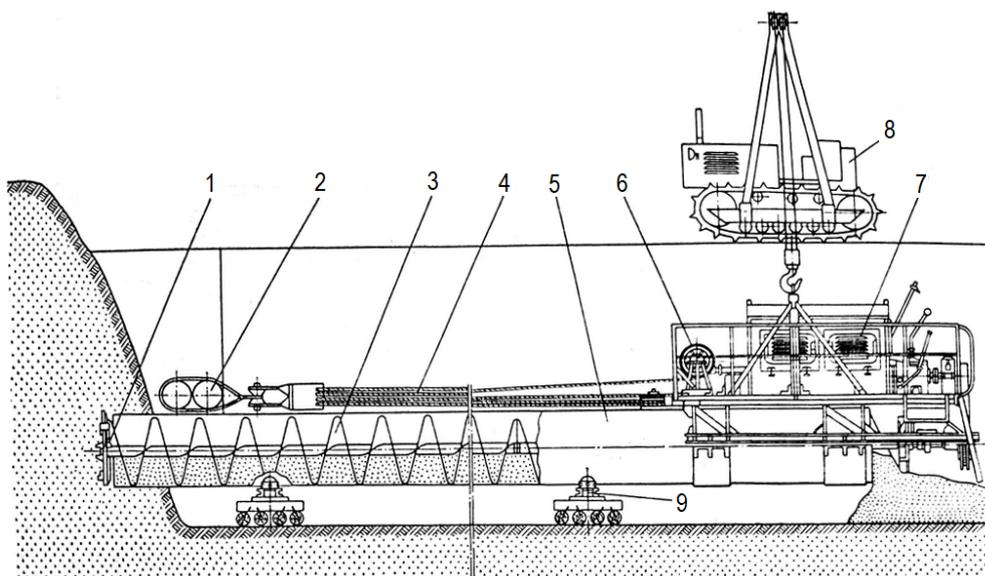


Рис. 2. Схема установки горизонтального бурения: 1 – буровая головка; 2 – якорь; 3 – шнековый транспортер; 4 – полиспастная система подачи; 5 – труба-патрон; 6 – тяговая лебедка; 7 – силовая установка; 8 – трубоукладчик; 9 – роликовая опора

Широкое применение пневматические тяговые устройства одностороннего действия нашли в комплектах оборудования для бестраншейной замены отслуживших свой срок коммуникаций [9]. Данная технология заключается в прокладке от стартового 1 до выходного 2 колодца нового трубопровода 3 взамен

старого 4 (рис. 3). Ведущей составной частью комплекта является пневматический ударный модуль 5 с передним рассекателем. Его постоянный надежный контакт с разрушаемой трубой и создание при этом необходимого напряжения обеспечиваются натяжением гибкого каната 7, проходящего через обводной блок 8 с упорной стойкой 6 на барабан тяговой лебедки 9. Выбор вида энергоносителя и типа привода данного механизма подачи обуславливаются следующими положениями:

1. Пневмоударный модуль и двигатель тяговой лебедки должны работать на одном и том же типе энергии – сжатом воздухе, что упрощает их техническое обслуживание и ремонт, способствует уменьшению эксплуатационных расходов.

2. Пневматические приводы не требуют сливных линий, мало чувствительны к внешним динамическим ударам и способны переносить неограниченно длительные перегрузки вплоть до полного стопорения без отказов и поломок.

3. Их высокий уровень надежности и долговечности. Так срок службы пневмосистем достигает 10...15 лет при их многомесячной круглосуточной эксплуатации [10].

4. Способность пневмодвигателей работать в широком диапазоне температур, в запыленной, влажной и коррозионной средах.

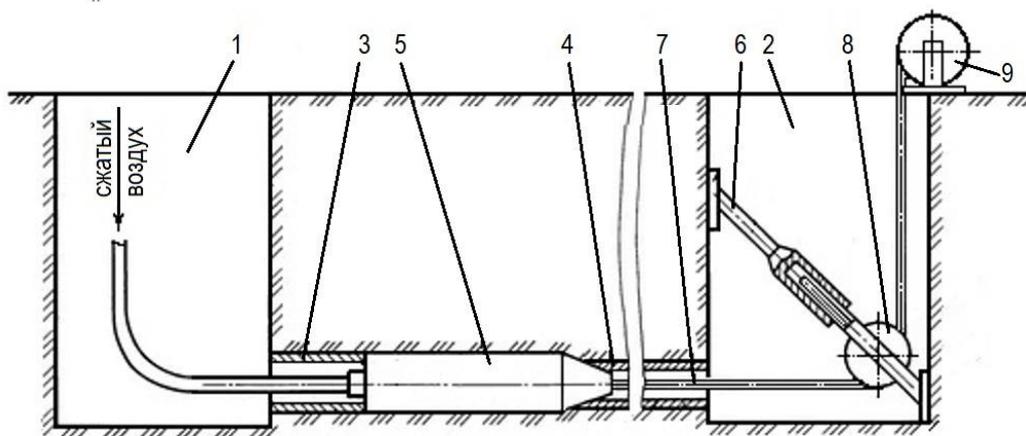


Рис. 3. Схема бестраншейной замены трубопровода: 1 –стартовый колодец; 2 – выходной колодец; 3 – протягиваемый трубопровод; 4 – заменяемый трубопровод; 5 – ударный модуль; 6 – упорная стойка; 7 – канат; 8 – обводной блок; 9 – тяговая лебедка

Целью работы является обоснование компоновочной схемы и создание силового тягового устройства для грунтопроходческого комплекса циклического действия с частичным уплотнением и экскавацией грунта.

## Теория Обсуждения

В специфические функции силового тягового механизма возвратно-поступательного действия для реализации способа циклической проходки скважин с частичным уплотнением и экскавацией грунта [11] входят следующие технологические операции:

1. Доставка грунтопроходчика к забою.
2. Постоянное статическое нагружение лобовой проекции забойной зоны для более эффективной ее разработки.
3. Извлечение устройства с набранным грунтовым керном из скважины в рабочий приямок для дальнейшей его разгрузки.
4. Формирование задающего управляющего воздействия на траекторию движения грунтопроходчика в массиве с возможностью ее коррекции и исправления в случае отклонения предварительно пройденного пионерного канала от проектной трассы перехода.

В соответствии с приведенными требованиями в качестве исполнительного механизма такого силового тягового оборудования предложена двухбарабанная канатная лебедка с приводом от пневматического двигателя вращательного действия типа П 8-12 мощностью 8 кВт с частотой вращения 750 об/мин [12]. Ее усилие на подающем и извлекающем канате рассчитывалось по предложенной методике, разработанной на основе проведенных исследований, и составляло 32 кН [13, 14]. Общий вид тягового оборудования показан на рис. 4. Выбранная компоновка обеспечивает его компактность и функциональность.

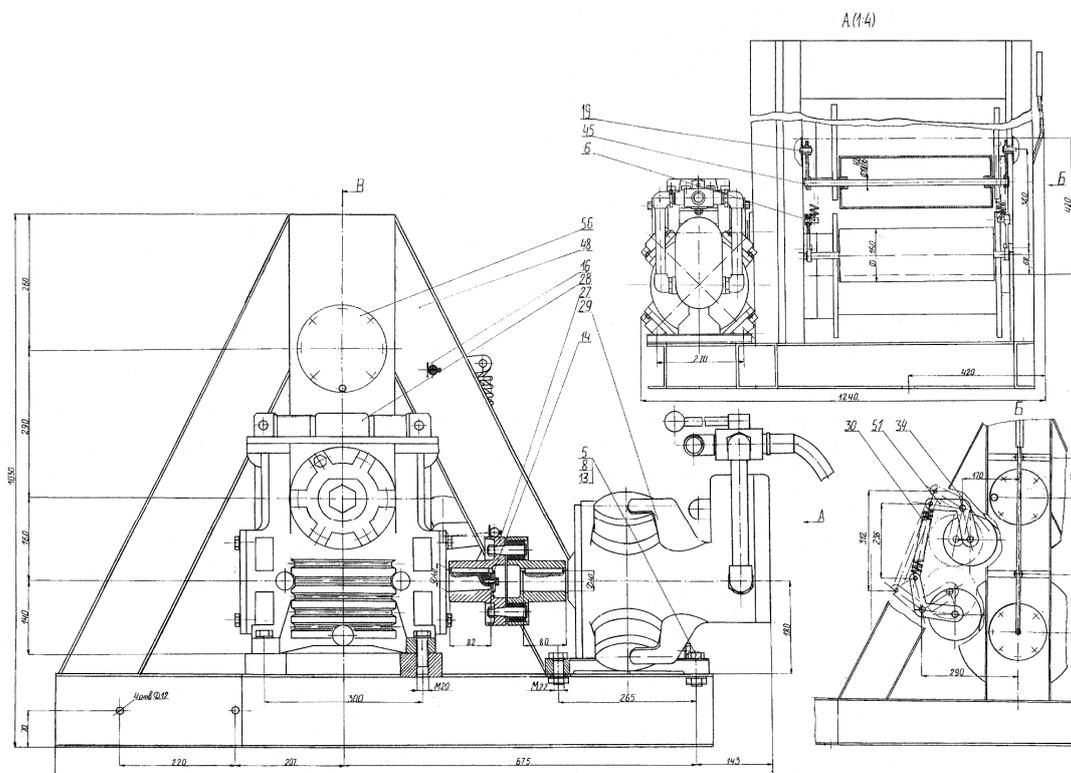


Рис. 4. Общий вид силового тягового механизма двустороннего действия



Работы велись в следующей последовательности:

- выполнение пневмопробойником пионерной скважины между рабочим и выходным котлованами;
- установка упорной рамы и тяговой лебедки в рабочем котловане, а портала с обводным блоком – в выходном, их последующее закрепление с помощью инвентарных анкерных стержней;
- прокладка в пионерную скважину подающего каната;
- прорезание в случае необходимости нового связующего канала с помощью гибкого режущего органа и двухбарабанной тяговой лебедки;
- циклическая проходка основной скважины.

Проведенные испытания показали, что применяемое оборудование для проходки скважин диаметром 325...426 мм комбинированным способом в целом удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям как по производительности, так и по своей функциональности и качеству получаемых каналов. В ходе их проведения установлено, что траектория получаемой скважины не зависит от направления пионерной, а определяется положением подающего каната в грунте. Этот факт позволяет осуществлять коррекцию движения грунтопроходчика в грунтовом массиве, задавая управляющее воздействие на него со стороны гибкой связи с силовым тяговым органом. Все полученные таким образом скважины были прямолинейны.

### ***Выводы***

Проведен краткий анализ известных устройств и представлены требования к силовым агрегатам, предназначенным для работы в составе проходческого комплекса циклического действия с частичным уплотнением и экскавацией грунта. Обоснована концепция канатного механизма двустороннего действия и его компоновочная схема, в рамках которой разработана и изготовлена двухбарабанная пневматическая лебедка с тяговым усилием 32 кН на каждом канате. Проведены ее испытания в составе комплекта оборудования для проходки скважин диаметром 325, 370, 426 мм. В ходе их проведения подтверждена работоспособность и функциональность созданного силового тягового оборудования.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика) / А. П. Рыбаков. – М.: ПрессБюро, 2005. – 304 с.
2. Кюн Г. Закрытая пркладка непроходных трубопроводов / Г. Кюн, Л. Шойбле, Х. Шлик. – М.: Сторйиздат, 1993. – 168 с.
3. Востриков В. И. О некоторых особенностях движения твердых тел при комбинированных виброволновом и статическом воздействиях / В. И. Востриков, В. Н. Опарин, В. В. Червов // ФТПРПИ. – 2000. – № 1. -
4. Червов В. В. Влияние частоты виброударного воздействия и дополнительного статического усилия на скорость погружения стержни в грунт / В. В. Червов, И. В. Тищенко, Б. Н. Смоляницкий // ФТПРПИ. – 2011. - № 1. – С. 61 – 70.
5. Смоляницкий Б. Н. Резервы повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных элементов в технологиях специальных строительных работ // Б. Н. Смо-

- ляницкий, И. В. Тищенко, В. В. Червов, В. П. Гилета, Ю. В. Ванаг // ФТПРПИ. – 2011. - № 5. – С. 45 – 52.
6. Данилов Б. Б. Повышение эффективности бестраншейных способов подземного строительства за счет применения пневмотранспорта / Б. Б. Данилов // ФТПРПИ. – 2006 - № 6. С. 75 – 86.
7. Ешуткин Д. Н. Высокопроизводительные гидропневматические ударные машины для прокладки коммуникаций / Д. Н. Ешуткин, Ю. М. Смирнов, В. Л. Исаев. – М.: Стройиздат, 1990. – 170 с.
8. Кершенбаум Н. Я. Прокладка горизонтальных и вертикальных скважин ударным способом / Н. Я. Кершенбаум, В. И. Минаев. – М.: Недра, 1984. – 245 с.
9. Патент 2057856 РФ. Рейфисов Ю. Б., Григорашенко В. А., Курленя М. В., Земцова А. Е., Плавских В. Д. П., Смоляницкий Б. Н., Леонов И. П., Тищенко И. В. Устройство для бестраншейной прокладки трубопроводов. – Опубл. в БИ, 1996, № 12.
10. Сафохин М.С. Горные машины и оборудование: Учеб. для вузов. / М.С. Сафохин, Б.А. Александров, В.И. Нестеров - М.: Недра, 1995. – 463 с.: ил.
11. Тищенко И. В. Комбинированная проходка скважин в грунте ударными устройствами с кольцевым инструментом / И. В. Тищенко, Б. Н. Смоляницкий, В. П. Гилета // ФТПРПИ. – 2014 - № 3. С. 87 – 97.
12. Зиневич В. Д. Пневматические двигатели горных машин / В. Д. Зиневич, Г. З. Ярмоленко, Е. Г. Калита. – М.: Недра, 1975. – 343 с.
13. Тищенко И. В. Определение основных параметров грунтопроходчика с пневмоударным приводом кольцевого рабочего органа / И. В. Тищенко, Б. Н. Смоляницкий // ФТПРПИ. – 2007 - № 5. С. 41 – 51.
14. Воронцов Д. С. Проходка скважин в грунте ударным устройством с кольцевым инструментом / Д. С. Воронцов, А. М. Петреев, Б. Н. Смоляницкий // ФТПРПИ. – 2005 - № 2. С. 53 – 58.
15. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс) –М. : Высш.шк., 1983 – 288 с.

© Ю.В. Ванаг, И. В. Тищенко, 2024

*Е. Г. Куликова<sup>1</sup>\**

## **Особенности самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей, закрепленных на основании малой изгибной жесткости**

<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: shevchyk\_78@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей, закреплённых на основании малой изгибной жесткости, каким является упругий рабочий орган вибротранспортирующих устройств, разработанных в ИГД СО РАН. Особенность этих машин заключается в волновом характере движения грузонесущего органа под действием вынуждающей силы, способствующем передаче энергии от одного дебалансного источника колебаний к другому, их подстройки друг под друга и постепенной самосинхронизации. Описана методика проведения и результаты лабораторных исследований влияния величины рассогласования парциальных частот вибровозбудителей и массы перемещаемого сыпучего материала на угол сдвига фаз дебалансов, как показатель устойчивости синхронного режима их вращения. Приведены данные, полученные при работе вибротранспортирующего устройства под нагрузкой фиксированной величины и при выпуске мерного объема, когда присоединённая масса сыпучего материала меняется от максимума до нуля.

**Ключевые слова:** упругий рабочий орган, дебалансные вибровозбудители, волновое движение, самосинхронизация, устойчивость синхронного режима, рассогласование парциальных частот, угол сдвига фаз, переменная нагрузка

*Е. G. Kulikova<sup>1</sup>\**

## **Features of self-synchronization of unbalanced vibration exciters mounted on the small bending stiffness base**

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia  
\* e-mail: shevchyk\_78@mail.ru

**Abstract.** The problem of unbalanced vibration exciters self-synchronization fixed on the small bending stiffness base, which is the elastic working body of vibration-transporting equipment developed at the Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, is described. The peculiarity of these machines is the elastic working body undulatory motion under the action of exciting force, which facilitates the transfer of energy from one unbalanced vibration exciter to another, their adjustment to each other and gradual self-synchronization. The techniques and results of laboratory research of the deviation between the partial frequencies of vibration exciters and the mass of transported bulk material effect on the unbalances phase-lag angle, as an index of the synchronous mode of their rotation stability, are described. The data obtained during operation of a vibration-transporting equipment under a fixed load and during the release of a measured volume, when the attached mass of bulk material changes from maximum to zero, are described.

**Keywords:** elastic working body, unbalanced vibration exciters, undulatory motion, self-synchronization, stability of synchronous mode, deviation between the partial frequencies, phase angle, variable load

## *Введение*

Горная техника всегда отличалась значительными габаритными размерами. С ростом объемов добычи полезных ископаемых увеличивается и грузоподъемность, а также конструктивные параметры транспортирующих машин и перегрузочных устройств, используемых на стыках различных технологических звеньев. В частности, устройства непрерывного действия, предназначенные для выпуска сыпучей массы из выработок или накопительных емкостей перегрузочных пунктов, а также для дальнейшего транспортирования должны иметь достаточно протяженный рабочий орган, обеспечивать бесперебойную перегрузку материала, надежно работать в тяжелых условиях при высоких статических и динамических нагрузках. Таким требованиям удовлетворяет вибрационная техника [1–11].

Вибромашины, созданные в ИГД СО РАН, имеют рабочий орган малой изгибной жесткости, отличающийся упругостью, достаточной для совершения волнового движения под действием вынуждающей силы виброисточника. Они имеют значительно меньшую металло- и энергоемкость, более широкие возможности для реализации различных режимов виброперемещения, могут использоваться для выпуска и перемещения сыпучих материалов, в том числе влажных и связных, в сравнении с машинами с жестким грузонесущим органом [12–17]. Для увеличения протяженности упругого рабочего органа и дальности транспортирования без значительного изменения конструкции виброустройства было предложено рассредоточить вынуждающую силу по пути перемещения, используя не один, а два или несколько вибровозбудителей. При этом инерционные вибровозбудители, закрепленные на упругом основании, имеют способность к самосинхронизации, что позволяет достичь поставленной цели без дополнительных кинематических связей между дебалансами отдельных виброисточников. Однако обеспечение устойчивости синхронного режима, полученного этим способом – в настоящее время не до конца решенная задача.

Наиболее полно самосинхронизация инерционных вибровозбудителей изучена в предположении, что вибрирующий орган машины, на котором они установлены, представляет собой твердое основание, подвижно закрепленное в пространстве с помощью системы упругих опор [18–25]. Полученные результаты исследований позволили создать вибрационные транспортирующие устройства с жестким грузонесущим органом и самосинхронизирующимися вибровозбудителями.

Волновой характер движения упругого рабочего органа вносит свои особенности в процесс самосинхронизации инерционных вибровозбудителей, что требует дополнительных исследований для определения условий устойчивого режима вращения всех дебалансов и обеспечения равномерного вибрационного поля вдоль грузонесущей поверхности вибротранспортирующего устройства.

## *Анализ*

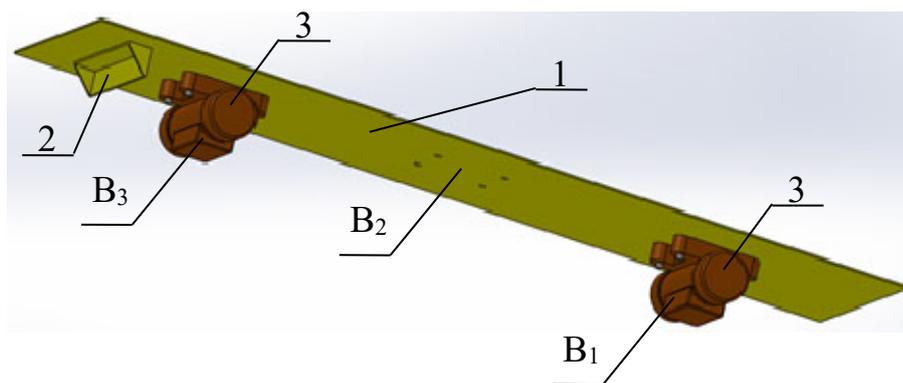
Основным условием самосинхронизации является близость парциальных угловых скоростей вибровозбудителей [26–28]. Установлено, что при волновом

движении рабочего органа интенсивность передачи энергии и взаимное влияние одного вибровозбудителя на другой зависят от длины волны, которая при прочих одинаковых параметрах определяется частотой колебаний, и расстояния между виброисточниками. Причем в рассматриваемой колебательной системе, находящейся под завалом сыпучего материала, работа одного вибровозбудителя в силу разных причин обеспечивает параметры вибрации, на порядок отличающиеся по величине. Подводимой ко второму вибровозбудителю мощности может быть недостаточно, чтобы изменить частоту вращения его дебалансов. Поэтому в условиях переменной нагрузки со стороны материала, выпускаемого из накопительной емкости, устойчивость синхронного режима зависит от его массы и равномерности распределения по длине транспортирующей поверхности виброустройства.

Для машин с жестким рабочим органом было определено, что устойчивость синхронного режима вращения дебалансов обеспечивается при их фазном или синфазном вращении. Исходя из этого назначается расположение вибровозбудителей друг относительно друга и частоты вращения их роторов. Учитывая особенности динамики упругого рабочего органа, были проведены исследования изменения угла сдвига фаз его виброисточников в зависимости от разницы частот вращения и массы перемещаемого сыпучего материала.

### *Методика проведения экспериментов*

Исследования выполнялись методом физического моделирования на стенде, включающим в себя бункер, транспортирующее устройство и виброизмерительный комплекс, получающий сигнал с пьезодатчиков. Рабочий орган виброустройства 1 (рис. 1), выполненный из стального листа с изгибной жесткостью, равной  $154 \text{ Н}\times\text{м}^2$ , свободно укладывался на раму через упругое основание.



1 – рабочий орган; 2 – упор; 3, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> – вибровозбудители и возможные варианты их размещения

Рис. 1. Конструктивная схема упругого рабочего органа

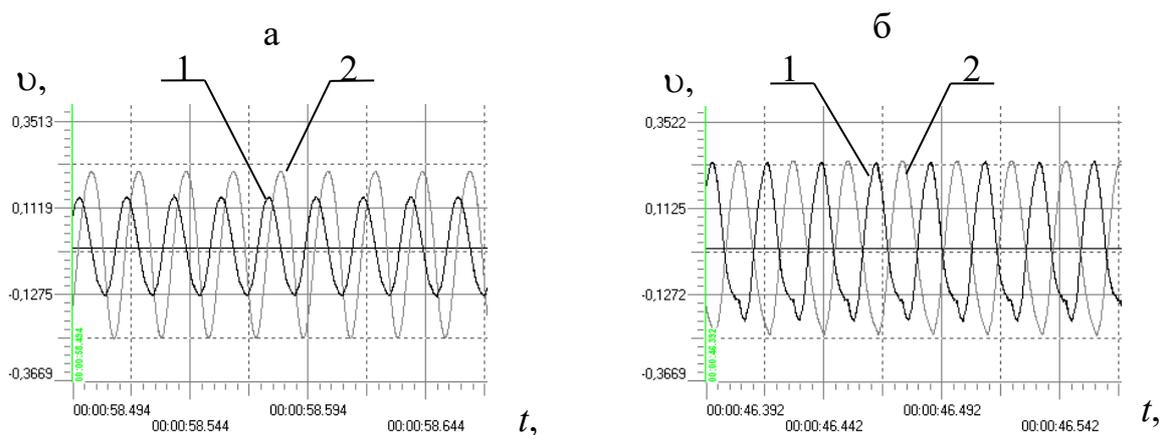
С его тыльной поверхности закреплялось два дебалансных вибровозбудителя 3 типа RZHF 40. Один из них находился на разгрузочном участке рабочего ор-

гана (положение  $V_1$ ), второй – на загрузочном или центральном участке (положения  $V_3$  и  $V_2$ ) с соответствующим изменением расстояния между ними с 0,85 м на 0,34 м. С помощью электронных преобразователей частоты серии F1500-G частота вращения ротора вибровозбудителя  $V_1$  устанавливалась на фиксированном значении в диапазоне 43 – 49 Гц, частота вращения дебалансов второго вибровозбудителя изменялась с шагом 0,1 Гц относительно него до наступления устойчивого синхронного вращения всех дебалансов.

Эксперименты проводились с использованием супеси с содержанием глинистой составляющей до 10% влажностью 4 – 6 %. Выполнялись измерения при ненагруженном рабочем органе, во время выпуска мерного объема и под постоянной нагрузкой, для чего масса сыпучего материала в накопительной емкости принималась равной 150, 350 или 550 кг, что соответствовало погонному весу 880, 2050 и 3235 Н/м.

Фиксируемым параметром являлась скорость вибрации, одновременно определяемая в шести точках транспортирующей поверхности, включая участки закрепления вибровозбудителей. Угол сдвига фаз вращения дебалансов определялся опосредованно по временному смещению осциллограмм гармонических колебаний, создаваемых на участках приложения вынуждающих сил.

### Результаты

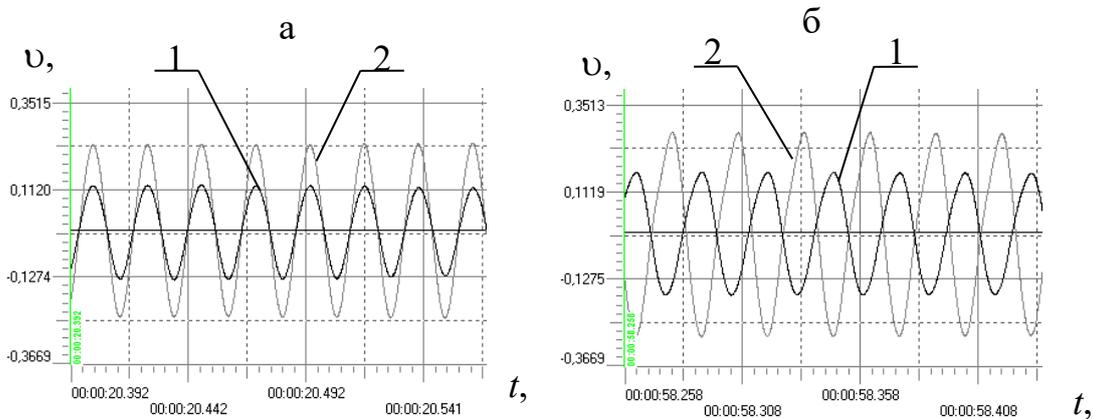


фазовый угол вращения  $\varphi$  дебалансов вибровозбудителей:  $a - \varphi = 90^\circ$  ( $\Delta f = 0,50$  Гц),  $b - \varphi = 180^\circ$  ( $\Delta f = 0,04$  Гц), 1,2 – виброскорость колебаний рабочего органа в точках  $T_{B1}$  и  $T_{B3}$  соответственно

Рис. 2. Осциллограммы колебаний рабочего органа при самосинхронизации вибровозбудителей  $V_1$  и  $V_3$

Установлено, что в выбранном диапазоне частот фазовый угол  $\varphi$  вибровозбудителей, работающих в устойчивом синхронном режиме на рабочем органе без нагрузки близок в  $180^\circ$ . С ростом величины рассогласования парциальных частот вибровозбудителей, закрепленных в положениях  $V_1$  и  $V_3$  с отношением  $l/l_B = 1,2 - 1,3$  (где  $l$  – длина волны, передаваемой от одного вибровозбудителя к другому,

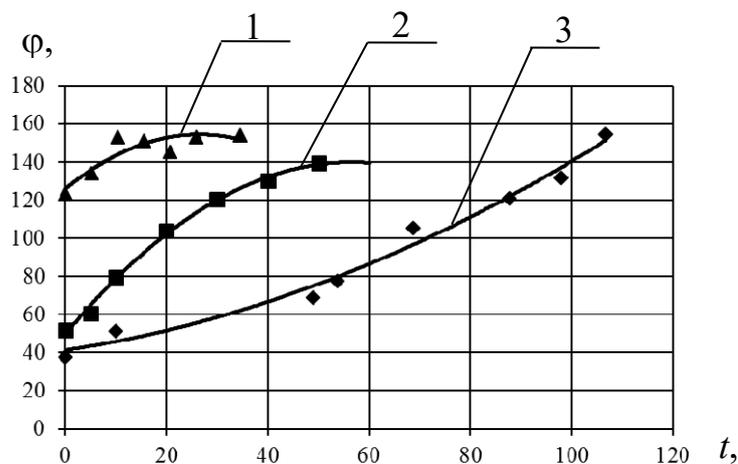
$l_B$  – расстояние между ними) угол  $\varphi$  уменьшается до  $87 - 90^\circ$  (рис. 2), а в положениях  $B_1$  и  $B_2$  и отношением  $l/l_B = 0,55 - 0,60$   $\varphi$  близок нулю.



фазовый угол вращения  $\varphi$  дебалансов вибровозбудителей: *а* –  $\varphi = 0^\circ$  ( $\Delta f = 0,46$  Гц), *б* –  $\varphi = 180^\circ$  ( $\Delta f = 0,03$  Гц), 1,2 – виброскорость колебаний рабочего органа в точках  $T_{B1}$  и  $T_{B2}$  соответственно

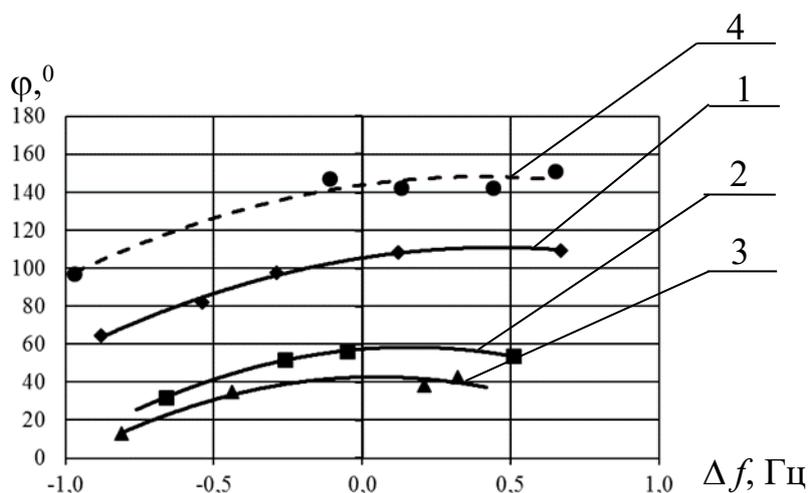
Рис. 3. Осциллограммы колебаний рабочего органа при синхронном вращении вибровозбудителей  $B_1$  и  $B_2$

Установлены зависимости значения угла  $\varphi$  от массы перемещаемой среды при волновом движении рабочего органа. На рисунке 3 представлены графики изменения угла сдвига фаз во время выпуска мерного объема сыпучего материала, т.е. при переменной нагрузке на транспортирующую поверхность виброустройства. На рисунке 4 – при постоянной нагрузке со стороны сыпучего материала. И в том, и другом случае отношение длины волны рабочего органа к расстоянию между виброисточниками составляло  $l/l_B = 0,6$ .



масса сыпучего материала в бункере: 1 – 150 кг; 2 – 350 кг; 3 – 550 кг

Рис. 4. Зависимость угла сдвига фаз синхронно работающих вибровозбудителей от времени выпуска сыпучего материала



погонная нагрузка сыпучего материала: 1 – 880 Н/м; 2 – 2050 Н/м; 3 – 3235 Н/м; 4 – 0 Н/м

Рис. 5. Зависимость угла сдвига фаз вибровозбудителей от величины рассогласования их частот и нагрузки на транспортирующую поверхность

### Обсуждение

Синхронный режим работы вибровозбудителей носит устойчивый характер, если величина рассогласования частот вращения их дебалансов  $\Delta f$  не превышает допустимое значение  $\Delta f_{\text{доп}}$ , определяемое интенсивностью энергии, передаваемой от одного виброисточника к другому. В противном случае возникают биения. Благодаря волновому характеру движения рабочего органа вибровозбудители могут работать синхронно с различным фазовым углом  $\phi$ , который при прочих одинаковых условиях зависит от разницы частот вращения виброисточников. При исследовании ненагруженного рабочего органа было установлено, что чем меньше эта разница, тем ближе вращение к противофазному. Интервал, в котором может изменяться фазовый угол, зависит от отношения длины волны  $l$ , возникающей в рабочем органе при работе каждого из источников колебаний в отдельности, к расстоянию между ними  $l_{\text{в}}$ . На рисунках 2 и 3 показаны результаты измерения виброскорости при синхронном вращении роторов вибровозбудителей, расстояние между которыми равно 1,2 – 1,3 от длины волны и 0,55 – 0,60 от нее же соответственно. Как следует из приведенных осциллограмм, при допустимом значении рассогласования частот в первом случае фазовый угол может принимать значения от  $90^\circ$  (рис. 2,а) до  $180^\circ$  (рис. 2,б), во втором – в интервале от  $0^\circ$  (рис. 3,а) до  $180^\circ$  (рис. 3,б). Причем, как отмечалось, синхронный противофазный режим реализуется в обоих случаях при малых значениях рассогласования частот виброисточников.

Если  $\Delta f$  превышает  $\Delta f_{\text{доп}}$  не более чем на 10 – 15%, то синхронный режим также наблюдается, но носит неустойчивый характер, то есть происходят периодические срывы на биения и восстановление режима. В таком случае при вибра-

ции ненагруженного рабочего органа угол сдвига фазы находится между  $0^\circ$  и  $180^\circ$  и меняет свое значение после каждого срыва.

Процесс выпуска из накопительной емкости мерного объема сыпучего материала сопровождается постепенным уменьшением нагрузки на грузонесущий орган виброустройства, изменением параметров его колебаний, и как результат, степени влияния вибровозбудителей друг на друга. Полученные данные показали, что выпуск массы 550 кг при  $l_B = (1,2 - 1,3)l$  сопровождается ростом амплитуды виброперемещения и уменьшением частоты колебаний, создаваемых каждым из вибровозбудителей, на 1 – 5 Гц. Из-за различий в условиях закрепления и нагружения загрузочного и разгрузочного участков рабочего органа эти изменения индивидуальны для каждого из виброисточников, что оказывает влияние на периодическое изменение величины рассогласования частот вращения их дебалансов и снижает устойчивость синхронного режима.

С уменьшением расстояния между виброисточниками до  $0,6l$  снижение частоты колебаний в процессе выпуска на участках закрепления вибровозбудителей становится почти одинаковым, мало влияя на величину рассогласования парциальных частот и устойчивость синхронного режима их работы. С изменением массы мерного объема материала от максимального значения до нуля величины и соотношения амплитуд колебаний постоянно изменяются, и подстройка вибровозбудителей друг под друга протекает непрерывно. В начальный момент выпуска массы 150 кг угол сдвига фаз составил  $120^\circ$  (рис. 4, кривая 1), а массы 550 кг –  $40^\circ$  (рис. 4, кривая 3). Со снижением уровня загрузки накопительной емкости угол  $\varphi$  возрастал до  $140^\circ - 150^\circ$ , стремясь к противофазе в независимости от начальной степени заполнения емкости. На протяжении всего времени выпуска биений не происходило, поэтому такой процесс можно считать устойчивым, хотя и не стабильным, так как изменение постепенное изменение угла  $\varphi$  каждый раз происходило по-разному.

В реальных условиях горного производства накопительные емкости редко опорожняются полностью. Под влиянием постоянно действующей распределенной нагрузки величина рассогласования  $\Delta f$  и угол  $\varphi$  также остаются неизменными. При работе с погонным весом материала 880 Н/м допустимый диапазон рассогласования парциальных частот составлял – 0,7 – + 0,7 Гц с изменением угла сдвига фаз от  $60^\circ$  до  $110^\circ$  (рис. 5, кривая 1). Увеличение погонной нагрузки до 2050 Н/м дало уменьшение амплитуды колебаний на участках закрепления виброисточников  $B_1$  и  $B_2$  в 1,2 – 1,3 и в 1,8 – 2,0 раза соответственно, что снизило влияние второго вибровозбудителя на первый в большей степени, чем первого на второй. Угол рассогласования фаз уменьшается до  $30 - 60^\circ$  (рис. 5, кривая 2). Дальнейший рост погонной нагрузки ведет к превышению величины погонной массы, т.е. массы сыпучего материала, участвующей в вибрационном движении [20], и снижению степени влияния на амплитуду колебаний рабочего органа. Увеличение нагрузки с 2050 до 3235 Н/м привело к дальнейшему уменьшению угла  $\varphi$ , но не более, чем на  $20^\circ$  (рис. 5, кривая 3). Было отмечено, что вращение дебалансов вибровозбудителей с близкими парциальными частотами сопровож-

дается практически неизменным углом сдвига их фаз при любой постоянной распределенной нагрузке сыпучего материала. В диапазоне  $\Delta f = \pm 0,3$  Гц угол  $\varphi$  меняется не более, чем на  $3 - 7^\circ$  относительно максимального значения при всех рассмотренных величинах нагружения рабочего органа, что свидетельствует об устойчивости синхронного режима.

Таким образом, для использования явления самосинхронизации необходимо подбирать виброисточники с близкими характеристиками так, чтобы их парциальные частоты отличались незначительно. В этом случае, как показал эксперимент, вращение вибровозбудителей стремится к постоянному значению, определяемому величиной присоединенной массы сыпучего материала и при работе ненагруженного рабочего органа близко к противофазному.

### *Заключение*

1. Одним из параметров, определяющих устойчивость синхронного режима вращения дебалансов инерционных вибровозбудителей, является угол сдвига их фаз. При закреплении виброисточников на рабочем органе малой изгибной жесткости его значение зависит не только от рассогласования парциальных частот, но и от амплитуды и длины волны, передаваемой от одного участка приложения вынуждающей силы к другому, расстояния между этими участками и величины распределенной нагрузки перемещаемого сыпучего материала.

2. Во время работы вибровозбудителей с практически равными угловыми скоростями на ненагруженном рабочем органе режим вращения дебалансов близок к противофазному, что соответствует результатам, полученным для машин с жесткими рабочими органами.

3. Использование виброустройства под завалом сопровождается уменьшением амплитуды на участках закрепления виброисточников и их взаимного влияния. Угол сдвига фаз уменьшается с увеличением высоты столба сыпучего материала. Однако благодаря волновому движению рабочего органа синхронный режим вращения сохраняется.

4. При полной разгрузке бункера величина рассогласования парциальных частот постепенно меняется. Вибровозбудители подстраиваются друг под друга на протяжении всего времени выпуска. За счет волнового движения и обеспечения максимально возможного допустимого рассогласования  $\Delta f_{\text{доп}}$  появляется возможность организовать устойчивый синхронный режим работы источников колебаний даже в условиях переменных нагрузок.

*Работа выполнена в рамках проекта НИР (№ государственной регистрации 121052600390-5).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денцов Н. Н. Экспериментальное исследование технических характеристик вибрационного питателя с параметрическим возбуждением // Вестник Башкирского университета. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 232–238.

2. Никитенко С. М., Худынцев Е. А., Кизилев С. А., Григоренко В. Ю. Устройство для выпуска угля на конвейер // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 3 (149). – С. 55–61.
3. Интенсификация погрузочно-транспортных работ на карьерах / С. Г. Молотиллов, Е. И. Васильев, О. Б. Кортелев и др. – Новосибирск: Из-во СО РАН, 2000. – 208 с.
4. Electric vibrating feeders (vibrating feeders) – Site access mode: [http://www.mtspb.com//production\\_current.php?id=4&id\\_group=22](http://www.mtspb.com//production_current.php?id=4&id_group=22).
5. Vibrating feeder – Site access mode: [http://www.break-day.com/ru/vibrating\\_feeder.htm](http://www.break-day.com/ru/vibrating_feeder.htm).
6. Vibratory Rock Screens / Feeders – Site access mode: <http://www.generalkinematics.com/mining/proddesc.cfm/productid/94>
7. Бауман В. А., Быховский И. И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М., 1977. – 255 с.
8. Dey K., Gobetti A., Ramorino G. Advances in understanding of multiple factors affecting vibration weld strength of thermoplastic polymers // Journal of Advanced Joining Processes. – 2023. – № 8. – 20 pp.
9. Suaza-Montalvo A., Cares-Pacheco V. G., Falk V. Time-dependent behaviour of industrial granular materials under vibration: Modelling and phenomenology // Chemical Engineering Science – 2023. – № 271. – 13 pp.
10. Van Zeebroeck M., Tijsskens E., Dintwa E., Kafashan J. and over The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: Case study of vibration damage during apple bulk transport. // Postharvest Biology and Technology – 2006. – № 41. – P. 92–100.
11. Bondarchuk S. V. Theory of impact sensitivity revisited: mechanical-to-vibrational energy transfer phenomenon // FirePhysChem – 2022. – № 2. – P. 334–339.
12. Тишков А. Я. Теория и практика создания машин для выпуска и доставки руды, основанных на принципе бегущей волны: Автореф. дис...докт. техн. наук. – Новосибирск, 1974. – 28 с.
13. Tishkov A. Ya., Eremenko Yu. I., Gendlina L. I. About vibration discharge of free-flowing bulk materials // Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh. – 1994. – № 2. – С. 93–96.
14. Тишков А. Я., Шевчук Е. Г. Влияние конструктивных параметров вибропитателя на выпуск сыпучего материала из бункера // ФТПРПИ. – 2002. – № 5. – С. 84–88.
15. Тишков А. Я., Гендлина Л. И., Еременко Ю. И., Левенсон С. Я. Вибрационное воздействие на сыпучую среду при выпуске ее из емкости // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – 2000 – №1 – С. 55-60.
16. Гендлина Л. И., Левенсон С. Я. К проблеме выпуска связных материалов вибрационным способом // Интерэкспо ГЭО-Сибирь-2017. XIIIМеждународ. науч. конгр.: Международ. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов. – Ново-сибирск: СГГА, 2017. – Том 2. – № 2. – С. 154–158.
17. Левенсон С. Я., Гендлина Л. И., Куликова Е. Г. Условия реализации эффективного вибро-выпуска материалов в современных технологиях добычи и переработки полезных ископаемых // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук – Новосибирск – 2017 – Т.4 – С. 28–33.
18. Смирнова В. Б., Утина Н. В., Проскурников А. В. Новые критерии самосинхронизации двух дебалансных вибровозбудителей. // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого): Материалы XVI Международной научной конференции. – М: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2022. – С. 403–407.
19. Шестаков В. М., Епишкин А. Е., Томчина О. П. Динамика автоматизированных электрических систем многороторных вибрационных установок. – СПб., 2014. – 106 с.

20. Вибрации в технике: Справочник. Т.4. Вибрационные процессы и машины/. Под ред. Э. Э. Лавендела – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
21. Ярошевич Н. П. Динамика вибрационных машин в условиях «слабой» самосинхронизации возбудителей. Авт. дис. на соискание уч. ст. д.т.н. / Институт проблем машиноведения Российской академии наук. Санкт-Петербург. – 2004.
22. Румянцев С. А., Тарасов Д. Ю., Шихов А. М. Оптимизация пусковых процессов вибротранспортирующих машин с тремя дебалансными вибровозбудителями. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 4 (16). – С. 46–52.
23. Жебелев А. А. Исследование условий самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей // Сб. «Материалы 78-й студенческой научной конференции. Материалы конференции». – Брянск. – 2023. – С. 533–536.
24. Ярошевич Т. С., Толстущко Н. Н., Ярошевич Н. П. Использование гармонических коэффициентов влияния для решения задач о кратной самосинхронизации вибровозбудителей, связанных с линейной колебательной системой // Вісник СевНТУ. – 2012. – № 133. – С. 79–84.
25. Багаев Д. З., Терентьева О. В., Томчина О. П. Управление кратной синхронизацией роторов трехроторной вибрационной установки при учете упругости карданных валов // Сб. «Неделя науки СПбГПУ. материалы научно-практической конференции с международным участием». – Институт информационных технологий и управления СПбГПУ. – 2014. – С. 109–112.
26. Блехман И. И., Васильков В. Б., Ярошевич Н. П. О некоторых возможностях совершенствования вибрационных машин с самосинхронизирующимися инерционными вибровозбудителями // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 3. – С. 18–22.
27. Блехман И. И. Частотная синхронизация и ее возможная роль в явлениях микромира // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 8. – С. 54–62.
28. Блехман И. И. Синхронизация динамических систем – М.: «Наука», 1971. – 894 с.

© Е. Г. Куликова, 2024

*С. Я. Левенсон<sup>1\*</sup>, М. А. Ланцевич<sup>1</sup>, А. В. Морозов<sup>1</sup>*

## **Оценка возможности сооружения скважин большого диаметра инерционно-ударным рабочим органом**

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: lev@misd.ru

**Аннотация.** Обосновано принципиально новое решение задачи безопасного и эффективного сооружения восстающих выработок различного назначения. Предложено в качестве расширителя при сооружении скважин большого диаметра применять породоразрушающий инструмент с рабочими органами в виде молотковых роторов, что дает возможность использования бурового станка, развивающего крутящий момент и напорное усилие, достаточные для бурения пилотной скважины. В процессе расширения энергия привода механизма подачи расходуется на преодоление сил внутреннего трения в самом механизме и не требует участия крутящего момента и напорного усилия бурового станка непосредственно в процессе разрушения материала молотковыми роторами. Предложенный способ позволяет отказаться от использования тяжелого и дорогостоящего импортного оборудования для сооружения скважин большого диаметра безвзрывным методом.

**Ключевые слова:** скважина большого диаметра, безопасность, импортозамещение, буровой станок, расширитель, молотковый ротор

*S. Ya. Levenson<sup>1\*</sup>, M. A. Lantsevich<sup>1</sup>, A. V. Morozov<sup>1</sup>*

## **Assessment of the possibility of construction of large diameter boreholes by inertial-impact working tool**

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: lev@misd.ru

**Annotation.** A fundamentally new solution to the problem of safe and efficient construction of up-rising mine workings for various purposes is substantiated. It is proposed to use rock-destroying tools with working bodies in the form of hammer rotors as reamers for construction of large-diameter boreholes, which makes it possible to use a drilling machine developing torque and pressure force sufficient for drilling a pilot borehole. In the process of reaming the drive energy of the feed mechanism is spent on overcoming the internal friction forces in the mechanism itself and does not require the participation of torque and pressure force of the drilling machine directly in the process of material destruction by hammer rotors. The proposed method allows to refuse the use of heavy and expensive imported equipment for construction of large-diameter wells by blastless method.

**Keywords:** large-diameter well, safety, import substitution, drilling machine, reamer, hammer rotor

Проходка восстающих выработок различного назначения является неотъемлемой частью горного производства. Это дорогостоящая, продолжительная и, при использовании взрыва, опасная операция. В настоящее время взрывная от-

бойка вытесняется методами бурения до проектного диаметра без взрывных работ [1-10]. Сооружение скважин большого (до 3...6 метров) диаметра выполняется следующим образом (рис. 1). Бурится направляющая (пилотная) скважина с верхнего горизонта вниз до транспортно-сортировочной выработки, затем с бурильной колонны снимается пилотное долото, устанавливается расширитель и скважина разбуривается в обратном направлении до окончательного диаметра. Разрушение породы производится шарошками расширителя за счет большого напорного усилия и высокого крутящего момента бурового станка. Разрушенная порода удаляется, как правило, погрузочно-доставочными машинами.

Современный уровень техники и технологий позволяет достаточно легко пройти таким способом выработку диаметром 3...4 метра. В отношении восстающих выработок большего диаметра в большинстве случаев сохраняются методы с использованием взрывной отбойки, несмотря на то, что оборудование для безвзрывного сооружения скважин диаметром до 6 метров существует [11-16].

Основным преимуществом безвзрывного способа сооружения скважин является его безопасность, так как отсутствуют негативные проявления взрывных работ. Однако, очевидны сложности, возникающие при использовании расширителей диаметром 4...6 метров.

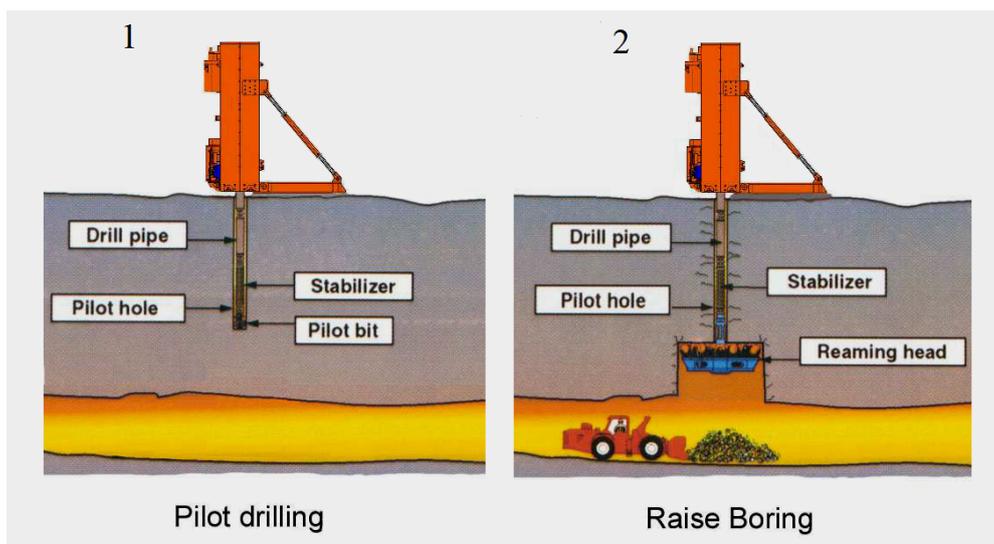


Рис. 1. Схема проведения восстающего методом выбуривания:  
 1 – бурение пилотной скважины; 2 – выбуривание восстающего с использованием расширителя

Для различных способов механического разрушения горных пород величина отношения удельной энергоемкости разрушения  $e$ , кВт ч/м<sup>3</sup>, к величине их крепости по шкале М.М. Протодяконова ( $K = e/f$ ) разная [2]. Так, при разработке горного массива с применением буровзрывных работ  $K = 0,25$ , при шарошечном бурении  $K = 7,7$ , при послойном ударном разрушении  $K = 0,25$ .

В расширителях большого диаметра используются шарошки с режущим профилем, позволяющим осуществлять проходку, как в монолитной, так и в смешанной или трещиноватой породе.

На рис. 2 представлена установка **Robbins 191RH**. Это самое мощное оборудование для бурения восстающих скважин, производимое компанией Atlas Copco. Модель **191RH** предназначена для проходки длинных восстающих скважин больших диаметров: от 4,5 м до 6,0 м (15-20 футов) при бурении на глубину до 1400 м (4500 футов).



Рис. 2. Буровая установка **Robbins 191RH**

Крутящий момент при расширении достигает 814 кНм, напорное усилие при расширении – 11600 кН, установленный силовой модуль имеет мощность 750 кВт (1000 л.с.). При работе используются буровые трубы диаметром 375 мм.

На рис. 3 представлен один из расширителей, производимых компанией Atlas Copco.



Рис. 3. Расширитель, производимый компанией Atlas Copco

Не каждое горное предприятие, несмотря на потребность, может позволить себе приобретение, монтаж и эксплуатацию, такого, несомненно, дорогостоящего оборудования.

В ИГД СО РАН для непрерывного послойного разрушения горных пород предложено использовать рабочий орган в виде молоткового ротора [17], общий вид которого представлен на рис. 4.

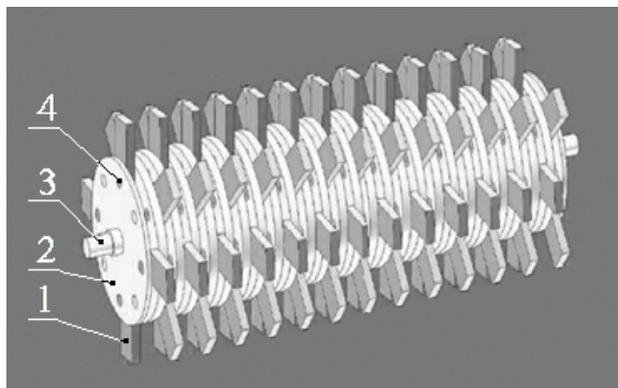


Рис. 4. Общий вид молоткового ротора:  
1 – молоток; 2 – диск; 3 – вал; 4 – ось

Молотки 1 расположены между дисками 2, которые жестко закреплены на валу 3. Молотки свободно с зазором подвешены на осях 4, а расположенные между соседними дисками развернуты относительно друг друга на угол  $45^{\circ}$ . Вращение ротора осуществляется от внешнего двигателя, который может быть электрическим, гидравлическим или пневматическим.

Кинетическая энергия, запасенная движущимся молотком, подвешенным на роторе, расходуется на разрушение скальваемой части породы при ударе по массиву. При взаимодействии молотка с горным массивом реакция породы замыкается в системе «порода – молоток» и лишь незначительно передается на элементы конструкции, поддерживающие молотковый ротор. Следовательно, можно ожидать, что коэффициент  $K$  приблизится к значению 0,25, как указано в [2].

Преимуществом способа, предложенного в ИГД СО РАН [18, 19] (рис. 5), является возможность использования бурового станка, развивающего крутящий момент и напорное усилие, достаточные для бурения пилотной скважины.

Это связано с тем, что при разрушении материала молотковыми роторами расширителя (рис. 6) основные затраты энергии приходятся на вращение рабочих органов (молотковых роторов) 1 через цепную передачу пневматическими двигателями 2, установленными непосредственно на расширителе, с подачей сжатого воздуха по буровому ставу 3, а крутящий момент бурового станка преодолевает возникающие при вращении бурового става силы трения. Дополнительного момента сопротивления вращению бурового става при вращении рабочего органа вокруг оси бурового става практически не возникает. Напорный механизм станка при разбурировании воспринимает в основном силу тяжести расши-

рителя при его перемещении вверх в процессе окончательного формирования скважины большого диаметра. Дополнительные осевые нагрузки на буровой став при работе молотковых роторов малы и ими можно пренебречь при выборе бурового станка.

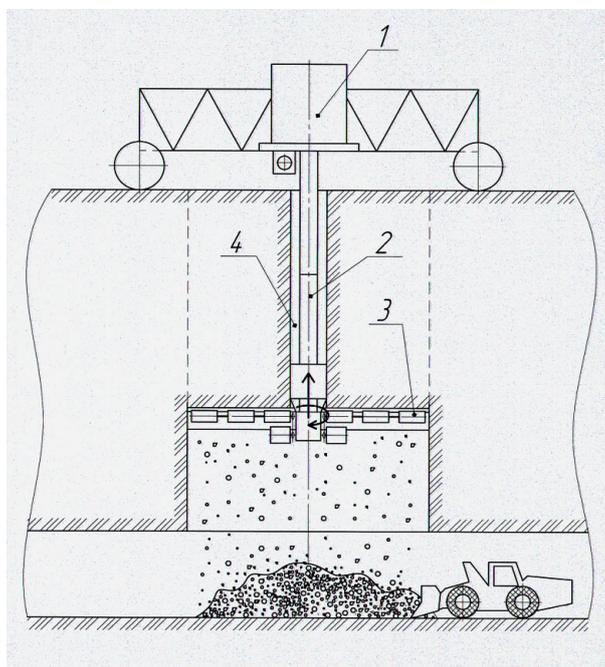


Рис. 5. Схема разбуривания пилотной скважины молотковыми роторами при ходе буровой колонны из транспортно-сортировочной выработки к устью пилотной скважины: 1 – буровой станок; 2 – буровой став; 3 – молотковый ротор; 4 – пилотная скважина

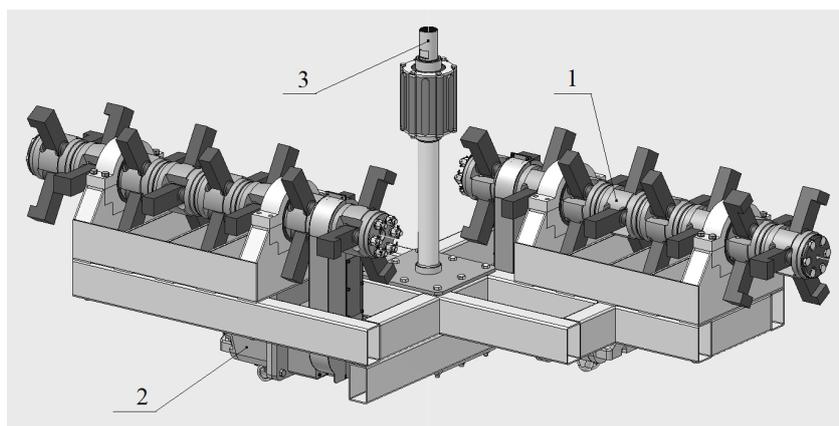


Рис. 6. Породоразрушающий инструмент с рабочими органами в виде молотковых роторов: 1 – молотковый ротор; 2 пневматический двигатель; 3 – буровой став

Подача молотковых роторов на забой при разбурировании складывается из двух движений: вращения молоткового расширителя вокруг оси бурового става и перемещения расширителя вдоль этой оси.

Косвенно оценить затраты энергии на подачу можно на стенде, разработанном в ИГД СО РАН (рис. 7), в процессе прямолинейного перемещения образца материала относительно вращающегося молоткового ротора.

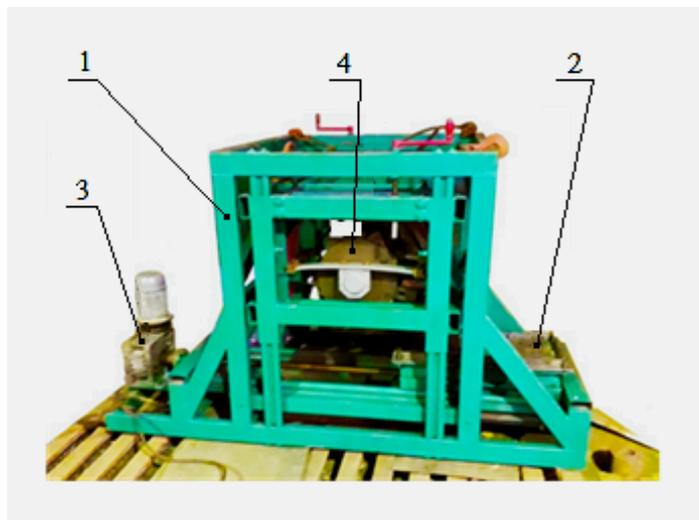


Рис. 7. Общий вид стенда для исследования инерционно-ударного разрушения материалов разной крепости

1 – рама; 2 – подвижный стол; 3 – механизм подачи; 4 – молотковый ротор

Стол 2 с закрепленным на нем материалом приводится в движение за счет работы привода 3, изменяя положение обрабатываемой поверхности образца горной породы, прикрепленного к этому столу, относительно вращающегося ротора 4 в процессе поступательного перемещения. Скорость движения стола 2 может изменяться в широких пределах и имитирует подачу рабочего органа (молоткового ротора) на забой. Скорость вращения молоткового ротора также может изменяться в широких пределах.

На рис. 8 представлена кинематическая схема стенда. Образец разрушаемого материала располагается на подвижном в продольном направлении столе, имеющем привод от электродвигателя  $M_2$ . Над ним размещается молотковый ротор, приводимый во вращение электродвигателем  $M_1$ . Положение ротора в вертикальной и горизонтальной плоскостях регулируется с помощью винтовых передач.

Затраты энергии могут оцениваться по изменению величины тока  $I_{вр}$  и  $I_{п}$  в обмотках электродвигателей приводов молоткового ротора  $M_1$  и механизма подачи  $M_2$  соответственно. Для получения необходимых данных в электрическую схему стенда включены датчики тока. Сигналы с датчиков фиксируются цифровым запоминающим осциллографом АКПП–72203 и передаются на персональ-

ный ЭВМ для сбора, последующей обработки с помощью специального программного обеспечения и анализа результатов измерений.

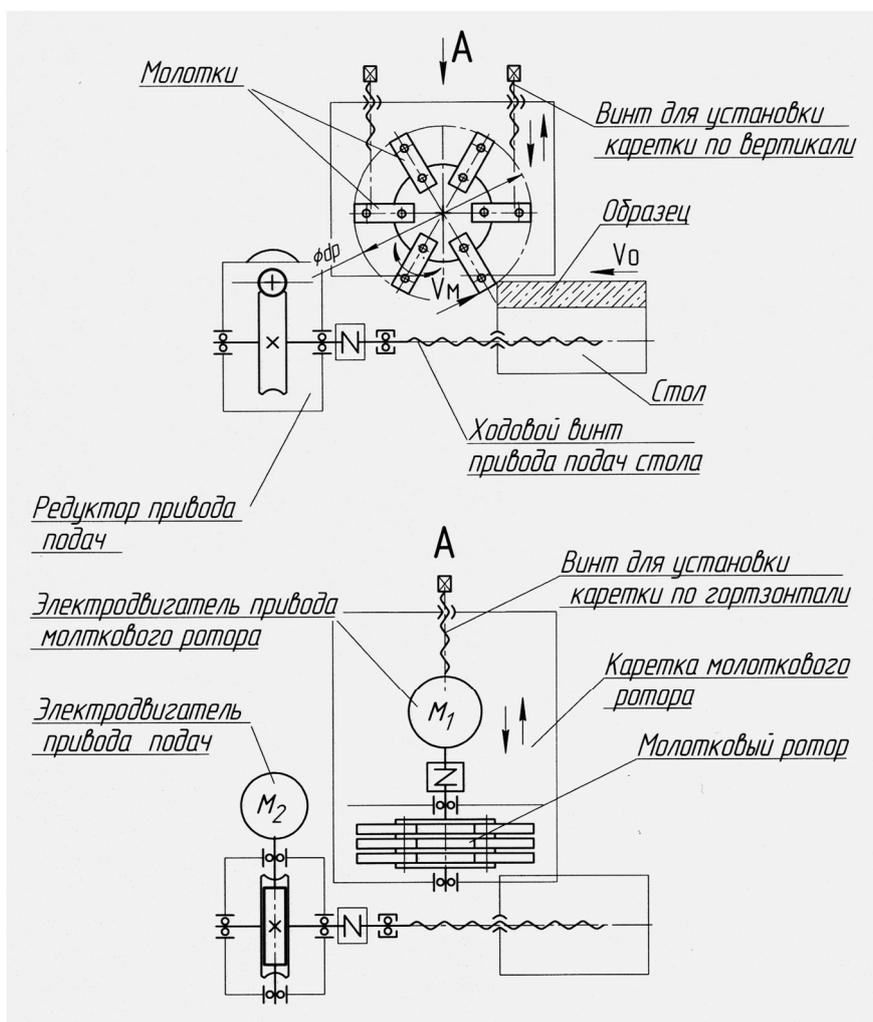


Рис. 8. Кинематическая схема стенда

Изменение динамической нагрузки на упругие поддерживающие элементы рабочего органа в зависимости от его конструктивных параметров и режима работы оценивается опосредованно через измерение амплитуды  $A$  и частоты  $\omega$  колебаний корпуса молоткового ротора, возникающих в процессе формирования штробы. С этой целью используется пьезоэлектрический акселерометр, закрепляемый на корпусе ротора и передающий сигнал на ЭВМ через усилитель заряда типа 2635 (фирма Брюль и Кьер, Дания) и аналого-цифровой преобразователь Е-440 (ЗАО Л-Кард, Россия). Сбор информации и последующая ее обработка осуществляются с помощью «Программного комплекса автоматизации экспериментальных и технологических установок АСТест©».

На стенде для исследования инерционно-ударного разрушения материалов разной крепости (рис. 7) выполнена серия экспериментов с целью обоснования формы ударных элементов молоткового ротора [20], в ходе которых оценивалось

изменение величины тока  $I_{вр}$  и  $I_{п}$  в обмотках электродвигателей приводов молоткового ротора  $M_1$  и механизма подачи  $M_2$  соответственно. Было установлено, что при изменении величины подачи в меньшую и большую стороны от рациональных значений, соответствующих наименьшим значениям затрат энергии на вращение молоткового ротора, изменения величины тока  $I_{п}$  в обмотках электродвигателя привода механизма подачи  $M_2$  в процессе разрушения не зафиксировано. Из этого следует, что энергия привода механизма подачи расходуется на преодоление сил внутреннего трения в самом механизме и не требует участия крутящего момента и напорного усилия бурового станка непосредственно в процессе разрушения материала молотковыми роторами.

### **Выводы**

Использование молотковых роторов в качестве рабочих органов расширителей при сооружении скважин большого диаметра безвзрывным способом позволит отказаться от использования тяжелого и дорогостоящего импортного оборудования в пользу распространенного и доступного отечественного оборудования.

Предлагаемое принципиально новое техническое решение может стать основой при разработке эффективных и безопасных методов проходки восстающих выработок различного назначения

Работа выполнена в рамках проекта НИР (№ государственной регистрации 121052600390-5).

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Регионы Севера и Арктики Российской Федерации: современные тенденции и перспективы развития: монография / Под науч. редакцией д.э.н., проф. Т. П. Скуфьиной, к.э.н. Н. А. Серовой. – Апатиты: КНЦ РАН, 2017. – 171 с.
2. Маттис А.Р., Ческидов В.И., Яковлев В.Л. и др. Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых. – Новосибирск: изд-во СО РАН, 2007. – 337 с.
3. Барях, А.А. Комплексное геомеханическое и геофизическое обеспечение безопасности подземных работ / А.А.Барях, И.А.Сапфиров // Горный журнал. – 2005. – № 12. – С.79–83.
4. Каманин, Ю. Н. Ределин Р. А., Кравченко В. А. Моделирование разрушения скальных пород гидравлическим устройством ударного действия // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. - №2 (129). – С. 30-34.
5. Каркашадзе, Г.Г. Механическое разрушение горных пород / М.; МГГУ-2004.- 222 с.
6. Холмский, А.В. Мероприятия по повышению эффективности ведения горных работ на глубоких рудниках / А.В. Холмский, Д.В. Сидоров // Маркшейдерия и недропользование. - 2019. – № 4. - С. 29-31.
7. Ушаков, Л. С. Рациональное природопользование на основе применения безвзрывных технологий для проведения подземных (горных) выработок / Л. С. Ушаков, В. Е. Климов // Проблемы и инновационные решения в области инженерного обеспечения экологической и промышленной безопасности урбанизированных территорий: Сб. тр. конф. / Под ред. В. А. Васильева. – Самара. – 2017. – С. 246. 46.
8. Лабутин, В.Н. Перспективы применения комбинированного способа разрушения горных пород / В.Н. Лабутин, В.С. Марков // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2015. - №12.

9. Демшина Н.А. Сверху вниз и обратно. Спецвыпуск журнала «Промышленные страницы Сибири» «Добывающая промышленность» №2 – 2015 г. <https://epps.ru/journal/detail.php?id=1436>.
10. Дж. Де Мура, Цзяньмин Ян, Батт С.Д. Обоснование модели прогнозирования скорости проходки тоннелепроходческих комплексов и установок для бурения восстающих // ФТПРПИ. – 2023. – № 1. – С. 79 – 91.
11. Лабутин, В.Н. Безвзрывная технология добычи полезных ископаемых: состояние и перспективы. Ч. II: Оценка эффективности применения различных способов разрушения в технологиях открытых горных работ / В.Н. Лабутин, А.Р. Маттис, Г.Д. Зайцев, В.И. Ческидов // ФТПРПИ. - 2004. - № 2. – С.66-74. 115
12. Титанов, А. В. Тенденции развития технологических установок для проходки восстающих / А. В. Титанов, С. А. Чернухин, А. А. Абдрахманов, Г. Г. Сафин. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2015. — № 22 (102). — С. 194-197. — URL: <https://moluch.ru/archive/102/23340/> (дата обращения: 03.04.2024).
13. Великанов В. С., Гуров М. Ю., Долганов А. В., Олизаренко В. В. Горные машины и оборудование подземных рудников. Конструкция и принцип работы. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. — 102 с.
14. Бенджамин Кюнстле, Александр Фрай. Установки для проходки восстающих выработок и стволов глубиной до 2000 м // Горная промышленность. - 2015. - № 6 (124). – С. 44-47. - ISSN 1609-9192.
15. Фокин А.Б. Обоснование конструкции стенда для исследования процесса инерционно-ударного разрушения твердых горных пород // Труды XXIV Международного симпозиума «Проблемы геологии и освоения недр». – г. Томск: ТПУ, 2020. – Т. 2. – С. 496 – 497.
16. Лабутин В.Н., Марков В.С. Перспективы применения комбинированного способа разрушения горных пород – /Горный информационноаналитический бюллетень. – 2015. – №12. – С. 325-333
17. Голдобин В.А, Левенсон С.Я., Ланцевич М.А., Морозов А.В. Обоснование параметров рабочего органа струга для разрушения горных пород // Сборник трудов Всероссийской конференции «Проблемы развития горных наук и горнодобывающей промышленности» – Новосибирск, 2016. – Т.2 – С. 31–37.
18. Пат. 2709863 РФ. Способ сооружения скважин большого диаметра / В.В. Тимонин, В.А. Еременко, С.Я. Левенсон, М.А. Ланцевич и др., заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН, № 2019117375; заявл. 05.06.2019// Оpubл. в БИ. – 2019. – № 36.
19. Пат. 2762658 РФ. Устройство для сооружения скважин большого диаметра / М.А. Ланцевич, С.Я. Левенсон, А.Б. Фокин, заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН, № 2021119673; заявл. 06.07.2021// Оpubл. в БИ. – 2021. – № 36.
20. Куликова Е.Г., Левенсон С.Я., Морозов А.В. Обоснование формы ударных элементов молоткового ротора инерционно-ударного действия // ФТПРПИ. – 2023. – № 3. – С. 96 – 107.

© С. Я. Левенсон, М. А. Ланцевич, А. В. Морозов, 2024

*А. А. Леуткин<sup>1\*</sup>, Б. Ф. Симонов<sup>1</sup>, А. О. Кордубайло<sup>1</sup>*

## **Электронная система обнаружения крайних положений бойка электромагнитного молота**

<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: leutkin-alexandr@rambler.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрена проблема управления рабочим циклом скважинного виброисточника, созданного на базе электромагнитного молота. Питание молота виброисточника ранее осуществлялось по двум кабелям: силовому и сигнальному. Предложен метод управления на основе математического анализа токов катушек молота, позволяющий определять моменты прохождения бойка мимо полюсов электромагнитов и осуществлять коммутацию катушек. Для повышения надёжности в условиях низкой стабильности рабочих электрических параметров виброисточника, применяются методы адаптивного управления. В работе описан промышленный образец созданного устройства, проходящий испытания совместно с виброисточником. Применение разработанного устройства позволит снизить стоимость всего комплекса оборудования, а также повысить технологичность работ по вибровоздействию. Кроме того, технологии, реализованные в устройстве, позволяют применять его совместно с наземными электромагнитными молотами различного назначения, что упрощает их конструкцию.

**Ключевые слова:** скважинный виброисточник, электромагнитный молот, математический анализ, адаптивное управление, микроконтроллер, импульс тока

*А. А. Leutkin<sup>1\*</sup>, B. F. Simonov<sup>1</sup>, A. O. Kurdubaylo<sup>1</sup>*

## **Electronic System for Detecting the Extreme Positions of the Electromagnetic Hammer Striker**

<sup>1</sup> Chinacal Institute of Mining Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\* e-mail: leutkin-alexandr@rambler.ru

**Abstract.** The paper considers the problem of controlling the operating cycle of a downhole vibration source created on the basis of an electromagnetic hammer. The vibration source hammer was previously powered via two cables: power and signal. A control method is proposed based on mathematical analysis of the currents of the hammer coils, which makes it possible to determine the moments when the striker passes past the poles of electromagnets and to switch the coils. To increase reliability in conditions of low stability of the operating electrical parameters of the vibration source, adaptive control methods are used. The work describes an industrial prototype of the created device, which is being tested together with a vibration source. The use of the developed device will reduce the cost of the entire complex of equipment, as well as increase the manufacturability of vibration impact work. In addition, the technologies implemented in the device allow it to be used in conjunction with ground-based electromagnetic hammers for various purposes, which simplifies their design.

**Keywords:** downhole vibration source, electromagnetic hammer, mathematical analysis, adaptive control, microcontroller, current pulse

## ***Введение***

Традиционные методы извлечения нефти из пласта позволяют добыть не более 30-40% всего объёма ресурсов месторождения. Кроме того, с начала 60-х гг. XX века на многих разведанных месторождениях в СССР и за рубежом наметилась тенденция к снижению дебита скважин в результате кальмотации перфорационных отверстий обсадных колонн и призабойной зоны пласта. Эти факторы привели к активизации научных и опытно-промышленных работ по созданию и развитию методов увеличения нефтеотдачи (МУН) [1, 2]. Разработаны тепловые, физико-химические, биологические, гидроимпульсные МУН [3, 4, 5]. Одним из наиболее универсальных и экологичных физико-химических МУН является вибровоздействие на нефтяной пласт [6, 7]. В конце 80-х гг. XX века специалистами ИГД СО РАН были разработаны и испытаны наземные виброисточники, показавшие высокую эффективность вибровоздействия. Однако такие виброисточники имели большие массу, габариты и энергоёмкость. Кроме того, большая глубина залегания пласта приводила к значительному рассеянию энергии сейсмических волн в горных породах. Следующим этапом стала разработка скважинных виброисточников, размещаемых в скважине на уровне пласта. Это позволяет воздействовать непосредственно на нефтесодержащие породы пласта. Такое устройство было создано в ИГД СО РАН в 2019 г. на базе электромагнитного молота и гидравлических силовых элементов, преобразующих энергию от вертикального перемещения бойка молота в радиальные усилия, передаваемые на обсадную колонну скважины [8, 9, 10]. Промысловые испытания скважинного виброисточника, проведённые в 2023 г., показали существенный недостаток конструкции: подключение виброисточника к системе питания и управления (СПУ), размещаемой на поверхности, осуществляется двумя кабелями. Силовой кабель используется для питания катушек молота. По сигнальному кабелю в СПУ выводятся импульсы напряжения от датчиков крайних положений бойка молота. Получая эти импульсы, СПУ переключает катушки, обеспечивая возвратно-поступательное движение бойка и работу виброисточника.

Использование сигнального кабеля в составе виброисточника усложняет его монтаж и герметизацию в скважине, увеличивает стоимость всего комплекса оборудования и снижает надёжность конструкции. В связи с этим было принято решение отказаться от использования датчиков крайних положений бойка и создать устройство, с высокой точностью определяющее моменты переключения катушек на основе математического анализа их рабочих токов.

## ***Методы и материалы***

На рисунке 1 представлены осциллограммы токов катушек молота.

Импульс тока можно условно разделить на четыре участка. Участок 1 соответствует отсутствию тока в катушке в отключенном состоянии. На участке 2 происходит переходный процесс включения катушки и начала движения бойка под действием её магнитного поля. Участок 3 соответствует рабочему ходу бойка. Форма тока на этом участке может быть различной: постоянный ток, линейно

спадающий или возрастающий, пульсирующий с постоянной составляющей и т.д. Смена формы тока может произойти спонтанно во время хода бойка. На участке 4 происходит торможение бойка. При этом ток плавно нарастает до установившегося значения, соответствующего статическому состоянию молота. Нарастание тока на этом участке происходит медленнее, чем при переходном процессе на участке 2. Именно участок 4 является рабочим для электронной системы отслеживания (далее ЭСО) крайних положений бойка. Для определения участка 4 используется цифровой математический анализ тока катушки [11], позволяющий оценить скорость нарастания тока и выдать СПУ сигнал на переключение катушек.

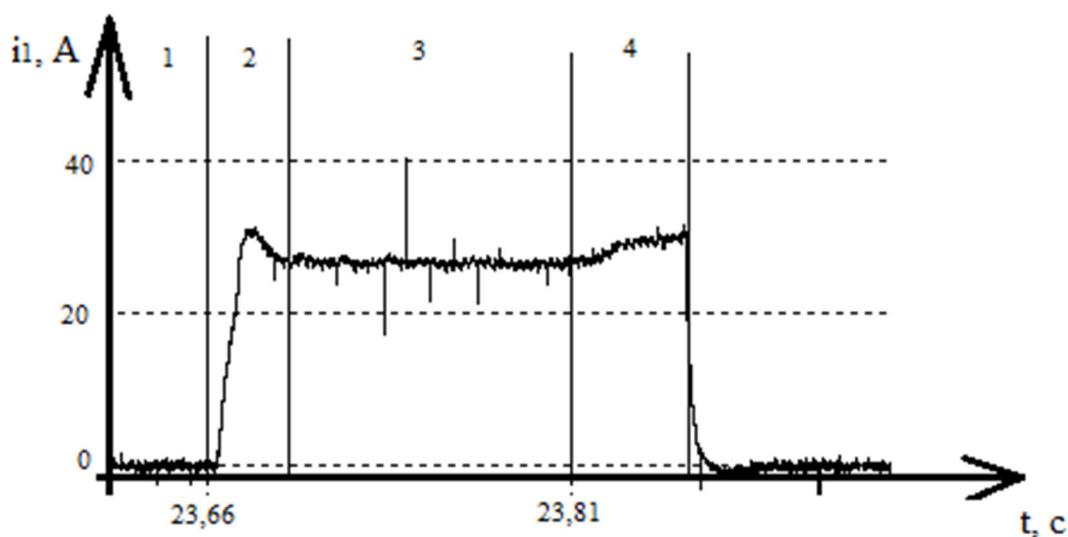


Рис. 1. Импульс тока катушки молота

При работе виброисточника, ЭСО располагается на поверхности, рядом с СПУ, в дальнейшем оно будет интегрировано в его состав. Внутреннее устройство ЭСО показано на рисунке 2.

Для обеспечения своевременного срабатывания ЭСО применена технология адаптивного управления [15, 16]. Микроконтроллер (МК) непрерывно отслеживает ток обеих катушек. При включении одной из них, МК, обнаружив ток в линии, оценивает его форму и величину. На основе этого МК принимает решение о методе поиска рабочего участка: обнаружение порога срабатывания, поиск минимального значения тока перед нарастанием либо прямое вычисление скорости нарастания. Кроме того, информация о величине тока применяется для оценки минимально возможного времени движения бойка. Это предохраняет ЭСО от ложных срабатываний.

Во избежание перегрева, виброисточник работает с перерывами. Типовой режим - 3 минуты работы и 7 минут охлаждения. Как только ЭСО обнаруживает период охлаждения по одновременному отсутствию тока в обеих катушках, происходит автоматический перезапуск.

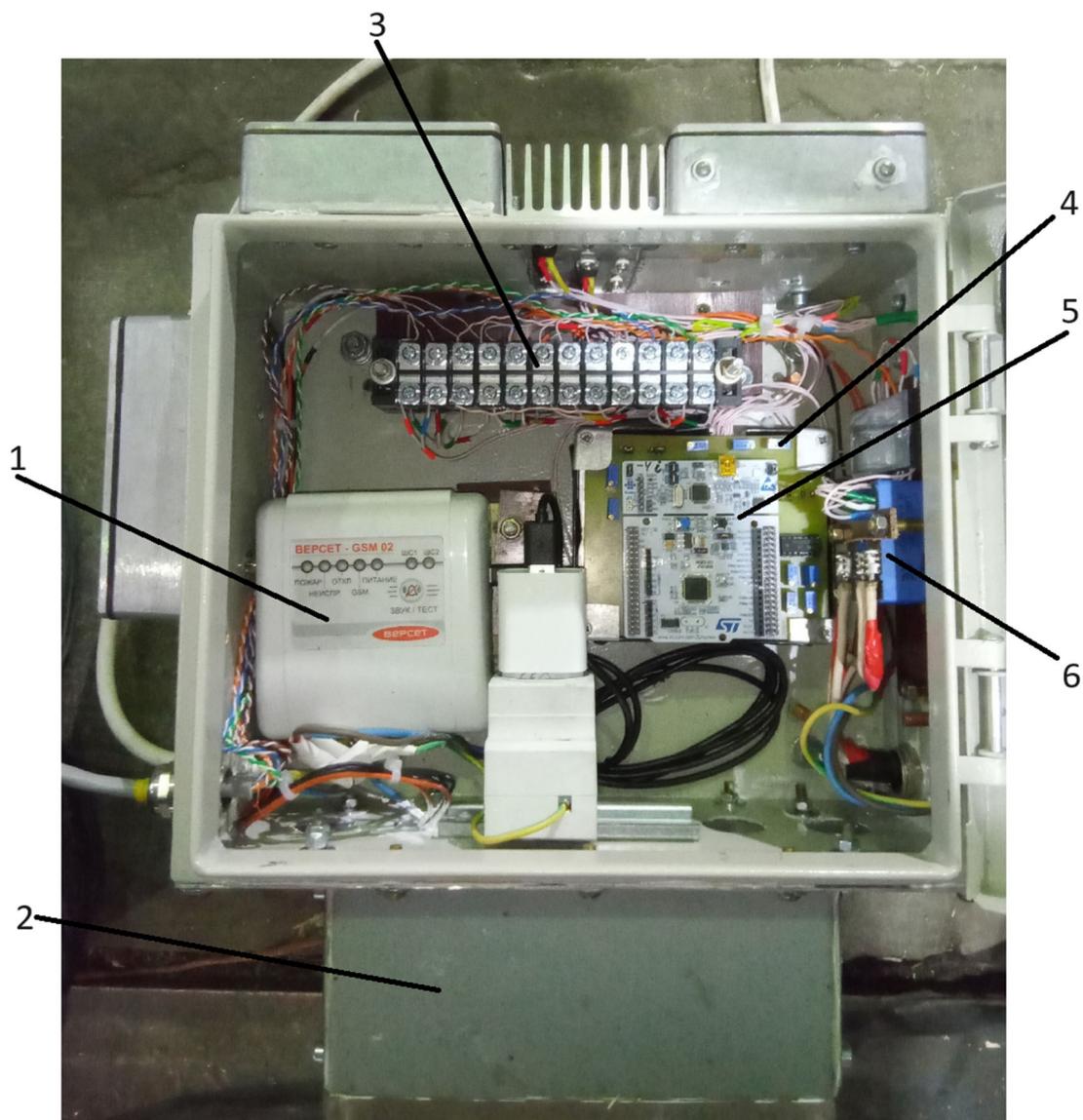


Рис. 2. Внутреннее устройство ЭСО: 1 – прибор доставки SMS-сообщений для дистанционного наблюдения за работой ЭСО; 2 – экранирующий корпус трансформатора; 3 – клеммная колодка, позволяющая конфигурировать ЭСО для выполнения разнообразных задач; 4 – главная плата со схемой предварительного усилителя, расширяющего диапазон рабочих токов ЭСО; 5 – плата микроконтроллера; 6 – датчики тока

Отдельное внимание уделено защите ЭСО от электромагнитных помех различного рода [17, 18] и механических воздействий. Все системы питания выполнены на линейных стабилизаторах напряжения LM317 [19]. Компоненты ЭСО размещены в стальном заземлённом корпусе со степенью защиты IP66. Вся незадействованная площадь медного покрытия печатных плат также заземлена. Трансформатор питания экранирован от остального объёма корпуса ЭСО. Для подавления пульсаций сигналов с предварительного усилителя используется цифровая фильтрация в программе МК [20].

## Результаты

Осциллограммы рабочих токов виброисточника приведены на рисунке 3.

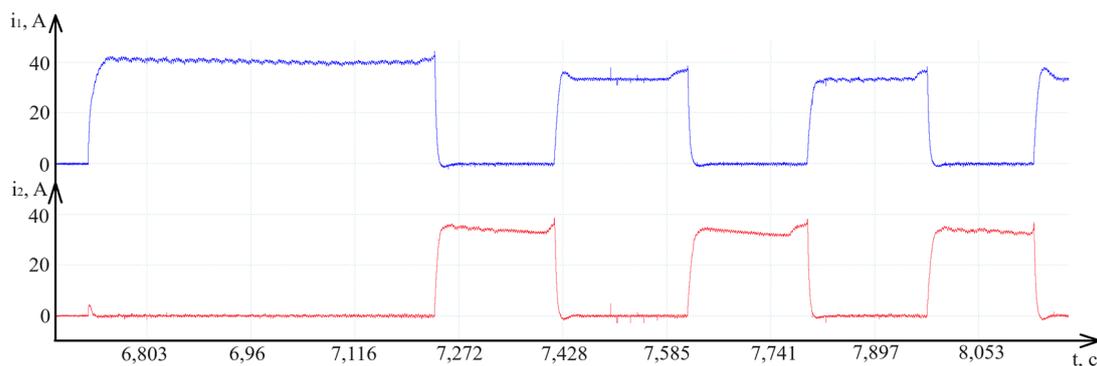


Рис. 3. Осциллограммы токов катушек виброисточника. Верхний график – ток верхней катушки, нижний график – ток нижней катушки

При испытаниях установлено, что система работает надёжно и не зависит от формы токов, безошибочно определяя участки срабатывания. ЭСО прошла промышленные испытания совместно с виброисточником на Урмышлинском месторождении летом 2023 г. и показала высокие результаты, обеспечив длительную работу виброисточника.

Технические решения, заложенные в программу МК, позволяют использовать ЭСО для управления работой строительных молотов. Боёк такого молота наносит удар по жёсткой свае или инструменту, поэтому ток катушки рабочего хода имеет короткий участок плавного нарастания. Первичные испытания ЭСО проводились на имитационной модели электромагнитного молота с катушками рабочего и обратного хода и упругим отбойником. Фотография стенда приведена на рисунке 4.



Рис. 4. Стенд с моделью электромагнитного молота

Осциллограммы работы приведены на рисунке 5. Исследования проводились с жёсткой и упругой наковальней.

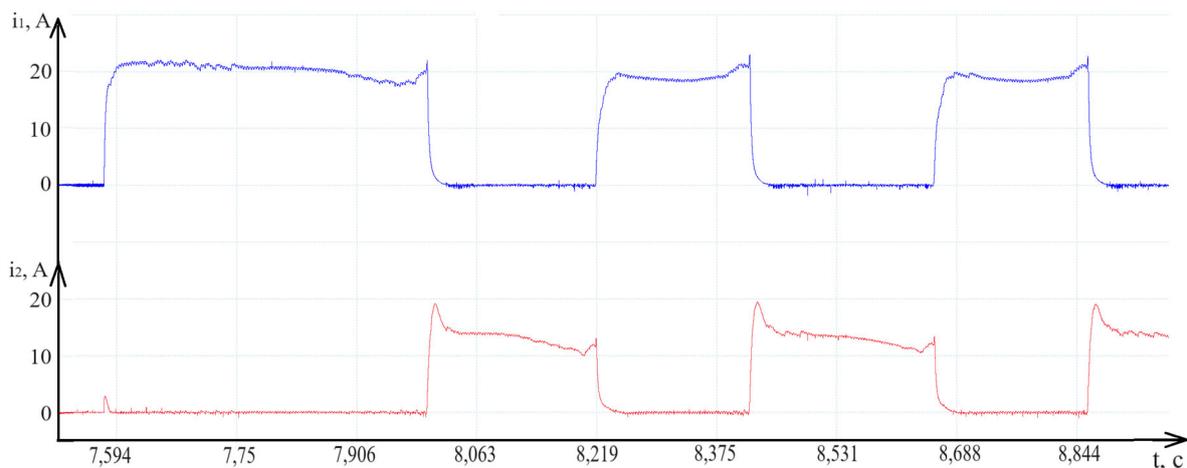


Рис. 5. Осциллограммы токов катушек модели молота. Верхний график – ток верхней катушки, нижний график – ток нижней катушки. Осциллограммы сняты при работе с упругой наковальней.

Отслеживание величины тока позволяет увеличить гибкость использования ЭСО. Например, ЭСО длительное время работала с молотом скважинного виброисточника с токами катушек 25-30 А. Требуется использовать её для управления работой небольшого строительного молота с рабочими токами 15-20 А. Для этого достаточно встроить силовые входы датчиков тока ЭСО в линии питания катушек молота, а также подключить импульсные выходы ЭСО к СПУ молота. Более никаких настроек не требуется. Для работы с более крупными молотами, имеющими рабочие токи 50-70 А, необходимо настроить вычитаемый сигнал в токовом усилителе. При этом ЭСО может работать с любыми токами.

### *Обсуждение*

Применение ЭСО совместно с виброисточником позволяет повысить точность переключения катушек, в отличие от индуктивных датчиков положения, использованных в исходной конструкции молота. Кроме того, работа ЭСО более соответствует динамике молота, что позволяет добиться малого дрейфа частоты ударов.

### *Заключение*

Разработано и в промышленных условиях испытано устройство, позволяющее осуществлять переключение катушек электромагнитного молота без использования датчиков положения бойка. Применение устройства позволяет повысить надёжность, эффективность и технологичность применения электромагнитных молотов. Несмотря на то, что изначально устройство разработано для работы со скважинным виброисточником, его можно применять также с электромагнитными молотами различного назначения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Газизов А. А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 639 с.
2. Sheng J. J., Leonhardt B., and Azri N. Status of polymer-flooding technology, *J. Can. Petr. Technol.*, 2015, Vol.54, Issue 2. – P. 116 – 126.
3. Bera A. and Babadagli T. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review, *Applied Energy*, 2015, Vol. 151. – P. 206 – 226.
4. Delamaide E., Bazin B., Rousseau D., and Degre G. Chemical EOR for heavy oil: The Canadian experience, *SPE EOR Conference at oil and gas West Asia 2014: Driving integrated and innovative EOR*, 2014. – P. 566 – 596.
5. Esmailzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z., Bahramian A., and Norouzbeigi R. Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery, *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2015, Vol. 26. – P. 1294 – 1303.
6. Дыбленко В.П., Марчуков Е.Ю., Туфанов И.А. и др. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с рудноизвлекаемыми запасами. – М.: РАЕН, 2012. – 344 с.
7. Симонов Б. Ф., Чередников Е. Н., Сердюков С. В. и др. Технология объёмного волнового воздействия на нефтегазовые залежи для повышения углеводородоотдачи пластов // *Нефтяное хозяйство*. – 1998. – № 4. – С. 42 – 44.
8. Симонов Б. Ф., Опарин В. Н., Кордубайло А. О., Востриков В. И. Экспериментальные исследования эффективности излучения от скважинного импульсного виброисточника // *ГИАБ*. – 2019. – № 8. – С. 180 – 189.
9. Кордубайло А. О., Симонов Б. Ф. Исследование конструкций скважинного электромагнитного импульсного виброисточника // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2020. – №5 – С.146–153.
10. Пат. 2642199 Российская Федерация, МПК E21B23/01 (2006.01). Скважинный сейсмоисточник / Б. Ф. Симонов, Ю. В. Погарский, А. О. Кордубайло, Ю. А. Лебедев; заявитель и патентообладатель ПАО «СилэнСейсмоимпульс»; заявл. 19.04.2017; опубл. 24.01.2018; Бюл. № 3. – 11 с.: ил.
11. Баховцев И. А. Микропроцессорные системы силовой электроники // *Новосибирск*. – 2021. – 230 с.
12. К. Титце. Полупроводниковая схемотехника / К. Титце, У. Шенк. – М.: Мир, 1982 г.
13. П. Хоровиц Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Бином. – 2019 г. – 704 с.: ил.
14. Б. Картер Операционные усилители для всех / Б. Картер, Р. Манчини. – М.: Додэка, 2011 г. – 544 с.: ил.
15. Мартинович М. В. Математическое моделирование устройств и систем. – Новосибирск: НГТУ, 2021 г. – 150 с.
16. Мартинович М. В. Силовая электроника для возобновляемой энергетики. – Новосибирск: НГТУ, 2022 г. – 180 с.
17. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств. 4-ое изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 636 с.: ил.
18. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. – М.: СОЛОН-Пресс, 2020. – 416 с.: ил.
19. Коробков Д. В. Основы преобразовательной техники // *Новосибирск*. – 2020. – 90 с.
20. Oppenheim Alan V. Discrete-time signal processing / Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, with John R. Buck. – 2nd ed., 1999.

© А. А. Леуткин, Б. Ф. Симонов, А. О. Кордубайло, 2024

*Н. А. Мирошниченко<sup>1\*</sup>, А. В. Панов<sup>1</sup>*

## **Закономерности пространственно-временного распределения энергетических параметров техногенной сейсмичности при отработке Таштагольского железорудного месторождения**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\*e-mail: mna@misd.ru

**Аннотация.** Реализован подход, позволяющий выявить закономерности пространственно-временного распределения параметров детерминированных и случайных процессов, происходящих в геомеханическом пространстве геотехнических объектов на стадии промышленной разработки. Суть подхода заключается в создании длинных временных рядов, описывающих 1) эволюцию полей напряжений  $S$ , полученных расчетным путем с использованием верифицированной 3D геомеханической модели; 2) суммарную энергию  $W$  сейсмических событий, вызванных горными работами в различных пространственных блоках исследуемого объекта. Между этими рядами рассчитаны коэффициенты корреляции и выявлены статистически значимые связи  $W$ - $S$ , которые могут быть использованы для прогнозных оценок интегральных параметров сейсмического процесса. При реализации подхода на основе базы данных техногенной сейсмичности Таштагольского рудника и 3D геомеханической модели, реализованной методом конечных элементов, установлено, что: с увеличением глубины разработки очаги выброса сейсмической энергии в блоках мигрируют в сторону выработанного пространства и располагаются, как правило, в рудном теле; практически на всех уровнях добычи существуют пары пространственных блоков, в которых суммарная энергия  $W$  сейсмических событий имеет сильную корреляцию со средним значением максимального напряжения сдвига.

**Ключевые слова:** индуцированная сейсмичность, породный массив, 3D геомеханическая модель, поле напряжений, горные работы, энергия сейсмического события

*N. A. Miroshnichenko<sup>1\*</sup>, A. V. Panov<sup>1</sup>*

## **Regularities of spatio-temporal distribution of energy parameters of induced seismicity in mining Tashtagol iron ore deposit**

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia  
\*e-mail: mna@misd.ru

**Abstract.** An approach has been implemented to identify regularities of spatiotemporal distribution of parameters of deterministic and random processes occurring in the geomechanical space of geotechnical objects at the industrial development stage. The approach consists in long time series creation describing: 1) the evolution of stress fields  $S$  obtained by calculation using a verified 3D geomechanical model; 2) total energy  $W$  of seismic events caused by mining operations in various spatial blocks of the object under study. The correlation coefficients have been calculated between these series and statistically significant  $W$ - $S$  relationships have been revealed, which can be used for predictive estimates of the integral parameters of the seismic process. When implementing the approach, based on the induced seismicity database of the Tashtagol ore mine and the original 3D geomechanical model implemented by the finite element method, it was established that: with increasing mining depth, the centers of seismic energy release in blocks migrate towards the goaf and located, as a rule,

in the ore body; at almost all mining levels, there are pairs of spatial blocks in which the total energy  $W$  of seismic events have a strong correlation with the average value of the maximum shear stress.

**Keywords:** induced seismicity, rock mass, 3D geomechanical model, stress field, mining, seismic event energy

### ***Введение***

Закачка сжиженного газа в подземные хранилища, захоронение промышленных отходов в природных формациях и выработанных пространствах, колебания уровня воды в природных и искусственных резервуарах, добыча углеводородов и твердых полезных ископаемых – вот не полный перечень процессов, вызывающих перераспределение напряжений в геосреде и, как следствие, увеличение количества и энергии сейсмических событий.

Изучение роли напряженного состояния в эволюции сейсмичности сводится, как правило, либо к оценке главных напряжений на основе механизмов очагов землетрясений и построению кругов Мора [1], либо к установлению статистической взаимосвязи между уровнями напряжений и сейсмичностью [2], что иногда позволяет реализовать элементы прогноза [3]. По-видимому, это обусловлено сложностью разработки и верификации детальных геомеханических моделей, позволяющих описывать поле напряжений крупномасштабных геологических объектов при недостатке информации об их строении и свойствах.

Для мезомасштабных объектов (месторождений полезных ископаемых) разработка геомеханической модели не представляет технических трудностей [4,5]: геологическое строение, физические свойства горных пород и компоненты естественного поля напряжений определяются на этапах разведки месторождения и проектирования рудника или добычи; изменения конфигурации выработанного пространства отображаются на планах горных работ. Все горнодобывающие предприятия оснащены системами микросейсмического мониторинга [6,7], которые отслеживают текущее состояние и формируют каталоги динамических событий. Комплекс такой детерминированной и стохастической информации используется в данной статье для выявления связи между геомеханическими и сейсмическими полями посредством регрессионного анализа длинных временных рядов энергетических параметров микросейсмической эмиссии и полей напряжений в различных частях геотехнического объекта среднего масштаба – действующего рудника.

### ***Геомеханическая модель геотехнического объекта и поля напряжений***

Промышленная эксплуатация ТЖМ началась в 1940 году, способ отработки горизонтальный (высота отметки 70 м) с техногенным обрушением; с начала 2000-х годов на некоторых участках выработанное пространство заполняется твердеющими смесями [8]. К настоящему времени горные работы достигли абсолютных глубин 800–850 м.

В работе использованы данные о наведенной сейсмичности с 1991 по 2020 гг. в стандартном формате  $\{D_n, \vec{R}_n, E_n\}$ , где  $n$  – номер события,  $D_n$  – дата и время,  $\vec{R}_n = (X_n, Y_n, Z_n)$  – локальные координаты гипоцентра,  $E_n$  – энергия.

Поле естественных напряжений, определенное по сеймотектонической информации и данным инструментальных измерений [9], соответствует типу надвига:  $\sigma_H = 2.5\sigma_V$ ,  $\sigma_h = 1.3\sigma_V$  и  $\sigma_V$  – максимальная, минимальная горизонтальная и вертикальная составляющие напряжений. Компонента напряжений  $\sigma_H$  ориентирована в направлении северо-запад – юго-восток.

ТЖМ-геомеханическая модель (детальное описание представлено в [4]) реализована с использованием метода конечных элементов по оригинальному коду [10]. Расчетная область – параллелепипед  $G = \{0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z\}$ , размеры которого  $L_x = 2500$  м,  $L_y = 4000$  м и  $L_z = 800$  м по осям декартовой системы координат  $(x, y, z)$  выбраны так, чтобы все обрабатываемые площади располагались внутри  $G$  на расстоянии не менее 500 м от  $\partial G$ , а вертикальные грани ортогональны направлениям  $\sigma_H$  и  $\sigma_h$ .

Для каждой конфигурации выработанного пространства  $m=1,2,\dots,M$  (соответствующей 1991, 1992, ..., 2020,  $M=30$ ), построенной на основе планов ведения горных работ, решается система уравнений линейной теории упругости

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,j} + \rho g \delta_{iz} &= 0, \\ \sigma_{ij} &= \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij}, \\ \varepsilon_{ij} &= 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}),\end{aligned}$$

где  $\sigma_{ij}$  и  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензоров напряжений и деформаций,  $u_i$  – смещения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\lambda, \mu$  – параметры Ламе. Для  $\partial G$  сформулированы следующие граничные условия:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}(0, y, z) &= \sigma_{xx}(L_x, y, z) = q_x \sigma_V(z), \\ \sigma_{xy}(0, y, z) &= \sigma_{xy}(L_x, y, z) = 0, \quad \sigma_{xz}(0, y, z) = \sigma_{xz}(L_x, y, z) = 0; \\ \sigma_{yy}(x, 0, z) &= \sigma_{yy}(x, L_y, z) = q_y \sigma_V(z), \\ \sigma_{xy}(x, 0, z) &= \sigma_{xy}(x, L_y, z) = 0, \quad \sigma_{yz}(x, 0, z) = \sigma_{yz}(x, L_y, z) = 0; \\ \sigma_{zz}(x, y, 0) &= \sigma_V(0), \quad u_z(x, y, L_z) = 0, \\ \sigma_{xz}(x, y, 0) &= \sigma_{xz}(x, y, L_z) = 0, \quad \sigma_{yz}(x, y, 0) = \sigma_{yz}(x, y, L_z) = 0,\end{aligned}$$

где  $q_y = 2.5$  и  $q_x = 1.3$  – коэффициенты бокового распора,  $\sigma_V(z) = \rho g(H + z)$  – вертикальное (литостатическое) напряжение в нетронутом массиве горных пород,  $H = 500$  м – расстояние от верхней грани  $G$  до дневной поверхности.

Поля напряжений  $\sigma_{ij}(m)$  рассчитывались на каждом этапе добычи  $m$ . На рис. 1 показаны изолинии компоненты  $\sigma_{yy}$  (по простиранию рудного тела) на различных этапах обработки на горизонте  $z = -210$  м. Они иллюстрируют процесс эволюции поля напряжений в процессе горных работ. Отметим увеличение зон напряжения, а также «миграцию» зон концентрации напряжений по мере продвижения горных работ вглубь и соответствующее изменение конфигурации выработанного пространства.

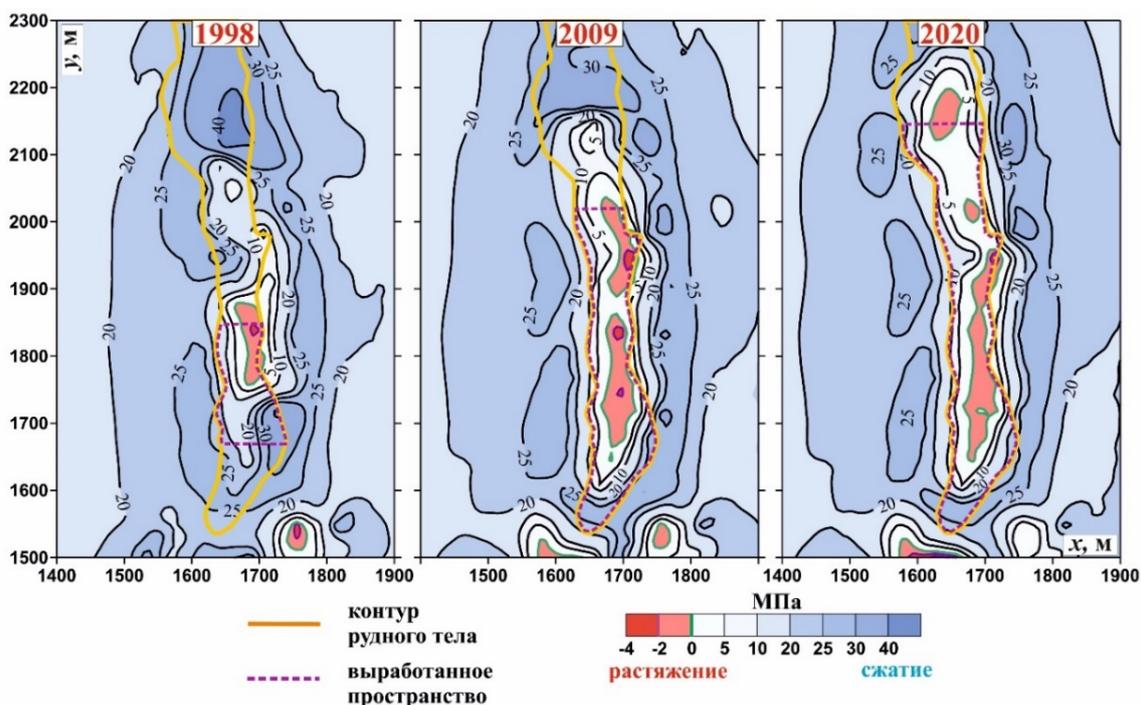


Рис.1. Распределение компоненты  $\sigma_{yy}$  тензора напряжений на горизонте  $z = -210$  м для различных этапов горных работ ( $m = 8, 19, 30$ )

### Качественный анализ индуцированной сейсмичности Таштагольского месторождения

В таблице 1 представлено количество слабых ( $E_n < 10$  кДж, классы от 0 до 3), умеренных и сильных ( $E_n \geq 10$  кДж, 4 класс и выше) событий за пятилетние периоды, а также их суммарная энергия. Видно, что с увеличением глубины разработки число слабых событий и их общая энергия неуклонно увеличиваются. Для умеренных и сильных событий в 2000-2010 гг. эта закономерность нарушается из-за изменений в технологии добычи, что привело к временному уменьшению количества событий с энергией более 10 кДж.

Таблица 1

Число и суммарная энергия сейсмических событий

Класс событий	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020
	Горизонт добычи, м					
	-140	-210	-280	-280	-350	-350
	Число сейсмических событий					
0-3	1319	1774	6188	5920	8428	13324
4-8	208	208	191	210	550	693
	Суммарная энергия, МДж					
0-3	0.482	0.808	1.534	1.555	1.611	2.068
4-8	454	993	567	890	318	495

Разобьем расчетную область  $G$  на одинаковые пространственные блоки  $P(k, l)$  – параллелепипеды  $500 \times 500 \times 70$  м (размер по вертикали равен высоте горизонта),  $l = 1, \dots, 7$  – номер горизонта,  $k = 1, \dots, 40$  (рис. 2). Размеры блоков выбраны так, чтобы в зоне влияния горных работ число слабых событий превышало 30.

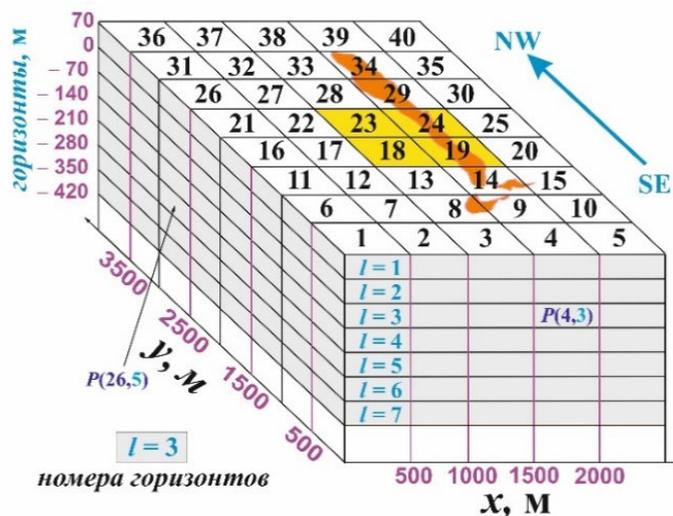


Рис. 2. Разбиение расчетной области на параллелепипеды для пространственно-временного анализа параметров наведенной сейсмичности

Используя сейсмическую базу данных, вычислим в каждом блоке  $P(k, l)$  полную энергию  $W$  слабых, умеренных и сильных сейсмических событий

$$W(k, l, m) = \sum_{n \in C_{klm}} E_n,$$

где  $C_{klm} = \{n | (X_n, Y_n, Z_n) \in P(k, l) \& 0 < D_n - 1990 - m \leq 1\}$ , затем найдем энергию в вертикальном столбце  $W_s(k, m) = W_s(k, 1, m) + \dots + W_s(k, 7, m)$  и координаты центра выделения сейсмической энергии (ЦСЭ)

$$\vec{R}(k, l, m) = \sum_{n \in C_{klm}} E_n \vec{R}_n / W(k, l, m).$$

На рис. 3 представлены результаты расчетов, иллюстрирующие основные качественные закономерности пространственного распределения энергии сейсмических событий при очистных работах:

– за редким исключением, ЦСЭ (зелеными кружками показана проекция ЦСЭ в вертикальном столбце на верхнюю границу исследуемой площади  $G$ ) в блоках  $P(19, l)$  и  $P(24, l)$ , где ведется добыча полезных ископаемых, расположен в рудном теле;

– с увеличением глубины разработки энергия сейсмических событий в блоках  $P(19, l)$  и  $P(24, l)$  увеличивается, а в соседних с ними – уменьшается.

Можно предложить следующее объяснение выявленным закономерностям: вблизи выработанного пространства деформации возрастают, упругие характеристики руды значительно больше, чем у вмещающих пород, поэтому именно в горной породе имеется более высокая концентрация упругой энергии, которая может высвободиться в виде динамических событий. С переходом добычи полезных ископаемых на более глубокие горизонты эта тенденция усиливается.

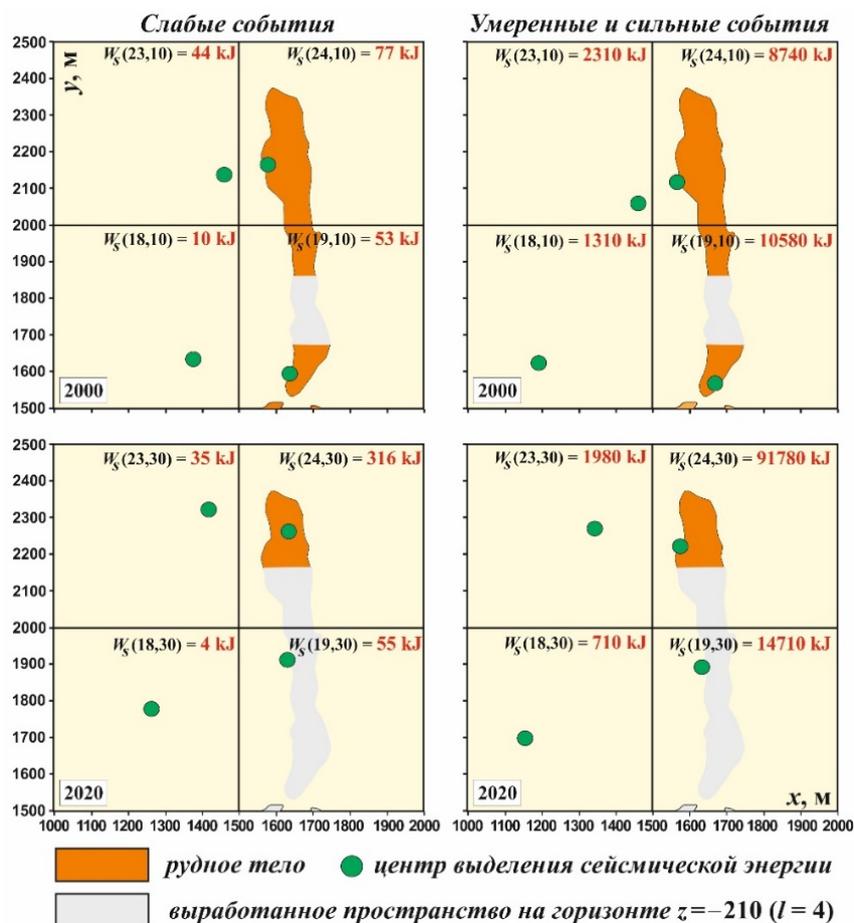


Рис. 3. Пространственное распределение энергии слабых, умеренных и сильных событий и центров выделения сейсмической энергии (горизонт  $z = -210$  м)

### **Корреляционный анализ параметров индуцированной сейсмичности и поля напряжений**

В период с 1991 по 2020 годы на ТЖМ происходило не более 120 событий умеренной и сильной динамики в год, т.е. в среднем менее одного события на блок. При таком объеме информации невозможно провести статистический анализ, поэтому будем рассматривать только слабые события (класс 0-3).

Для совместного количественного анализа напряжений и сейсмичности введем обобщенную количественную характеристику напряженного состояния блока

$$\tau(k, l, m) = \frac{1}{V} \iiint_{P(k,l)} \tau_{\max}(m) dV, \quad (1)$$

где  $\tau_{\max}(m)$  – максимальное напряжение сдвига, рассчитанное по  $\sigma_{ij}(m)$  на каждом этапе добычи  $m$ ,  $V$  – объём блока  $P(k, l)$ . Таким образом, в каждом блоке формируются временные ряды детерминированных  $\tau(k, l, m)$  и случайных  $W(k, l, m)$  значений, и мы имеем возможность рассчитать коэффициенты корреляции

$$\xi_W(k, l, p, q) = \frac{\sum_{m=1}^M [W(k, l, m) - \bar{W}(k, l)][\tau(p, q, m) - \bar{\tau}(p, q)]}{M \sigma_W(k, l) \sigma_\tau(p, q)},$$

где  $\sigma_W^2(k, l) = \sum_{m=1}^M [W(k, l, m) - \bar{W}(k, l)]^2 / M$ ,  $\bar{W}(k, l) = \sum_{m=1}^M W(k, l, m) / M$ ,  
 $\sigma_\tau^2(p, q) = \sum_{m=1}^M [\tau(p, q, m) - \bar{\tau}(p, q)]^2 / M$ ,  $\bar{\tau}(p, q) = \sum_{m=1}^M \tau(p, q, m) / M$ .

Будем рассматривать только те  $\xi_W$ , которые удовлетворяют трем условиям: 1) абсолютное значение более 0.7 (имеется сильная зависимость параметров сейсмичности от напряжения); 2)  $t$ -критерий Стьюдента выполняется при уровне значимости 0.05; 3)  $F$ -критерий Фишера – при уровне значимости 0.05.

Анализ показал, что статистически значимые коэффициенты корреляции имеют место для пар блоков, находящихся в зоне влияния горных работ.

Теперь запишем уравнения линейной регрессии

$$W_{kl}(\tau) = \xi_W(k, l, p, q) \frac{\sigma_W(k, l)}{\sigma_\tau(p, q)} [\tau - \bar{\tau}(p, q)] + \bar{W}(k, l), \quad (2)$$

которые характеризуют зависимость полной энергии  $W_{kl}$  в блоке  $P(k, l)$  от среднего максимального касательного напряжения  $\tau$  в блоке  $P(p, q)$ . На рис. 4 показаны линии регрессии для некоторых пар блоков.

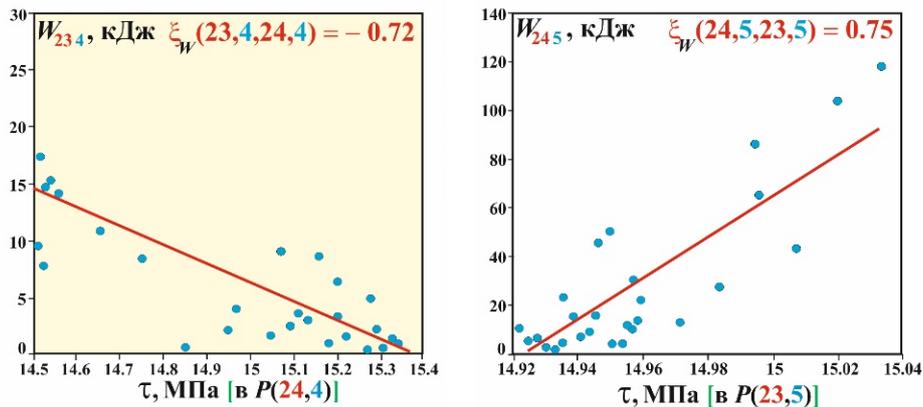


Рис. 4. Линии регрессии  $W - \tau$  для блоков со значимыми коэффициентами корреляции

## Заключение

Обоснован подход для выявления количественных зависимостей между параметрами пространственно-временного распределения показателей, характеризующих эволюцию стохастических и детерминированных физических полей в геологических средах, вызванных действием факторов различной природы. Подход апробирован на данных о техногенной сейсмичности и геомеханических полях в геомеханическом пространстве Таштагольского рудника.

Установлено, что: 1) с увеличением глубины разработки очаги умеренных и сильных сейсмических событий, а также центр выделения сейсмической энергии перемещаются ближе к выработанному пространству и концентрируются преимущественно в рудном теле, как более энергонасыщенном объекте по сравнению с вмещающими породами; 2) существуют пространственные блоки, в которых энергия слабых сейсмических событий имеет статистически значимую сильную корреляцию со средним значением максимального напряжения сдвига. Данные корреляционные зависимости пригодны для прогнозной оценки параметров сейсмичности путем форвардных расчетов полей напряжений с использованием верифицированных геомеханических моделей и долгосрочных планов развития горных работ.

*Работа выполнена в рамках проекта НИР № 124020700085-5.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Perez-Lopez R., Ramos A., Giner-Robles J. L. Stress and strain analysis and induced seismicity in geological gas storage (Yela, Spain) // Journal of Structural Geology. – 2022. – Vol. 161. – 104662.
2. Bourne S. J., Oates S. J., van Elk J. The exponential rise of induced seismicity with increasing stress levels in the Groningen gas field and its implications for controlling seismic risk // Geophysical Journal International. – 2018 – Vol. 213, No. 3. P. 1693–1700.
3. Smith J. D., Heimisson E. R., Bourne S. J., Avouac J.-P. Stress-based forecasting of induced seismicity with instantaneous earthquake failure functions: Applications to the Groningen gas reservoir // Earth and Planetary Science Letters. – 2022. – Vol. 594. – 117697.
4. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Панов А.В., Мирошниченко Н.А. Эволюция напряженно-деформированного состояния породного массива при отработке Таштагольского железорудного месторождения по результатам 3D-моделирования / ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ – 2016. Том 2 Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: сб. матер. XII Межд. научн. конгресса.– Новосибирск: Изд. СГУГиТ, 2016. С. 87–91.
5. Rahman M. J., Fawad M., Mondol N. H. 3D field-scale geomechanical modeling of potential CO2 storage site Smeaheia, Offshore Norway // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 4. – 1407.
6. Leake M. R., Conrad W. J., Westman E. C. et al. Microseismic monitoring and analysis of induced seismicity source mechanisms in a retreating room and pillar coal mine in the Eastern United States // Underground Space – 2017. – Vol. 2, No. 2. – P. 115–124.
7. Zhou Z., Huang Y., Zhao C. Distribution law of mine ground pressure via a microseismic sensor system // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – 649.
8. Анушенков А.Н. Производство закладочных работ. На примере Таштагольского подземного рудника. – Красноярск: СФУ, 2016. – 136 с.

9. Nazarova L. A. Estimating the stress and strain fields of the Earth's crust on the basis of seismotectonic data // Journal of Mining Science. – 1999. – Vol. 35. – P. 26–35.

10. Nazarova L. A., Nazarov L. A. Dilatancy and the formation and evolution of disintegration zones in the vicinity of heterogeneities in a rock mass // Journal of Mining Science. – 2009. – Vol. 45, No. 5. – P. 411–419.

© *Н. А. Мирошниченко, А. В. Панов, 2024*

*С. А. Павлов*

## **Моделирование процесса пылераспределения в угольной лаве при использовании струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне**

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: pavlov\_s\_a@inbox.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования изменения уровня средней массовой концентрации угольной пыли в воздухе рабочих зон машинистов очистного механизированного комплекса, при использовании струйного осевого вентилятора, установленного на добычном комбайне. С помощью программного комплекса Ansys Fluent проведен ряд вычисленных экспериментов, моделирующих перенос пыли в потоке воздуха от источников ее генерации при передвижении добычного комбайна по очистной выработке. Выявлены зависимости изменения концентрации угольной пыли при различном направлении движения вентиляционного потока относительно хода выемки угля, с учетом работы осевого струйного вентилятора, установленного на добычном комбайне. Показано, что такой способ проветривания очистного забоя позволяет снизить среднюю массовую концентрации угольной пыли в окрестностях работающего добычного комбайна на 13,8-36,7%.

**Ключевые слова:** вентиляция, проветривание, забой, лава, очистной комбайн, струйный вентилятор, угольная пыль, численное моделирование

*S. A. Pavlov*

## **Simulation of the dust distribution process in coal longwall using jet fan installed on a shearer**

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia  
\* e-mail: pavlov\_s\_a@inbox.ru

**Abstract.** The paper presents the results of a study of changes in the level of the average mass concentration of coal dust in the air of the working areas of the machinists of the cleaning mechanized complex, using a jet axial fan installed on a longwall shearer. With the help of the Ansys Fluent software package, a number of calculated experiments were carried out simulating the transfer of dust in the air stream from its generation sources during the movement of a longwall shearer in a treatment mine. The dependences of the change in the concentration of coal dust with different directions of movement of the ventilation flow relative to the course of coal excavation, taking into account the operation of the axial jet fan installed on the longwall shearer. It is shown that this method of ventilation of the treatment face allows to reduce the average mass concentration of coal dust in the vicinity of a working longwall shearer by 13.8-36.7%.

**Keywords:** ventilation, longwall, longwall shearer, jet fan, coal dust, numerical simulation

## ***Введение***

Наращивание интенсивности ведения горных работ приводит не только к увеличению добычи угля, но и к росту запыленности в горных выработках. Концентрация пыли на рабочих местах машинистов комбайна и крепи в лаве в среднем за смену составляет от 30 до 240 мг/м<sup>3</sup>, а при неудовлетворительном функционировании средств гидрообеспыливания – превышает технически достижимый уровень (ТДУ) [1-3].

В шахтах угольная пыль является одним из наиболее вредных и опасных факторов, которая приводит к возникновению профзаболеваний у горняков и образует с воздухом взрывчатые смеси в подземной атмосфере выработок. Наличие пыли в метано-воздушной среде снижает границу взрываемости метана до 3 %. Участие угольной пыли при детонации метана увеличивает силу взрыва и его разрушительную способность, которая часто бывает на порядок выше, чем просто у метано-воздушной смеси [4].

Поэтому, с целью уменьшения опасности возгорания и взрыва угольной пыли, целесообразно применять меры по снижению запыленности и пылеотложения в горных выработках. Для чего в сочетании с комплексным обеспыливанием воздуха при всех процессах угледобычи могут быть использованы водяные завесы и пылеулавливающие устройства [5-9].

В некоторых шахтах за рубежом для снижения концентрации пыли на рабочих местах машиниста комбайна и машиниста крепи на очистных комплексах дополнительно устанавливают аспирационные установки, способствующие более быстрой очистке воздуха от пыли и выносу ее из рабочей зоны [10-13].

Кроме того, предложен способ [14-16] по установке струйного вентилятора на очистном комбайне, для снижения аэродинамического сопротивления выемочного участка и выноса мелкодисперсной угольной пыли из рабочих зон забоя.

## ***Методы и материалы***

Уникальность добычных участков препятствует выявлению общих закономерностей. Поэтому, необходимо ограничиться параметрами, являющимися наиболее характерными для угольных горнодобывающих предприятий. На примере габаритов очистной выработки шахт Кузбасса, оценим эффективность их проветривания с применением струйных вентиляторов, установленных на очистном комбайне.

Мощность отрабатываемого пласта в исследованиях принята – 2,4 м, длина лавы – 400 м. Дополнительно в исследуемый участок было включено сопряжение лавы с вентиляционным и конвейерным штреками, длина каждого составляла 200 м (рис.1).

Осевой струйный вентилятор принят диаметром 0,6 м способный развивать скорость воздушного потока на выходе до 30 м/с. При этом средняя скорость воздуха по сечению лавы не превышает допустимой по ПБ – 4 м/с.

В настоящее время наблюдается тенденция изменения схемы проветривания, когда приток воздуха в лаву осуществляется по вентиляционному штреку, а исходящая из лавы струя отработанного воздуха уходит по конвейерному. Поэтому, в рамках данного исследования, рассмотрен этот вариант.

Основной поставленной задачей является определение влияния осевого струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, на пылевую обстановку в лаве, которая решалась отдельно от взаимодействия с метановоздушной смесью. Предварительные исследования показали, что концентрации метана и угольной пыли, в рассматриваемых моделях, не влияют друг на друга.

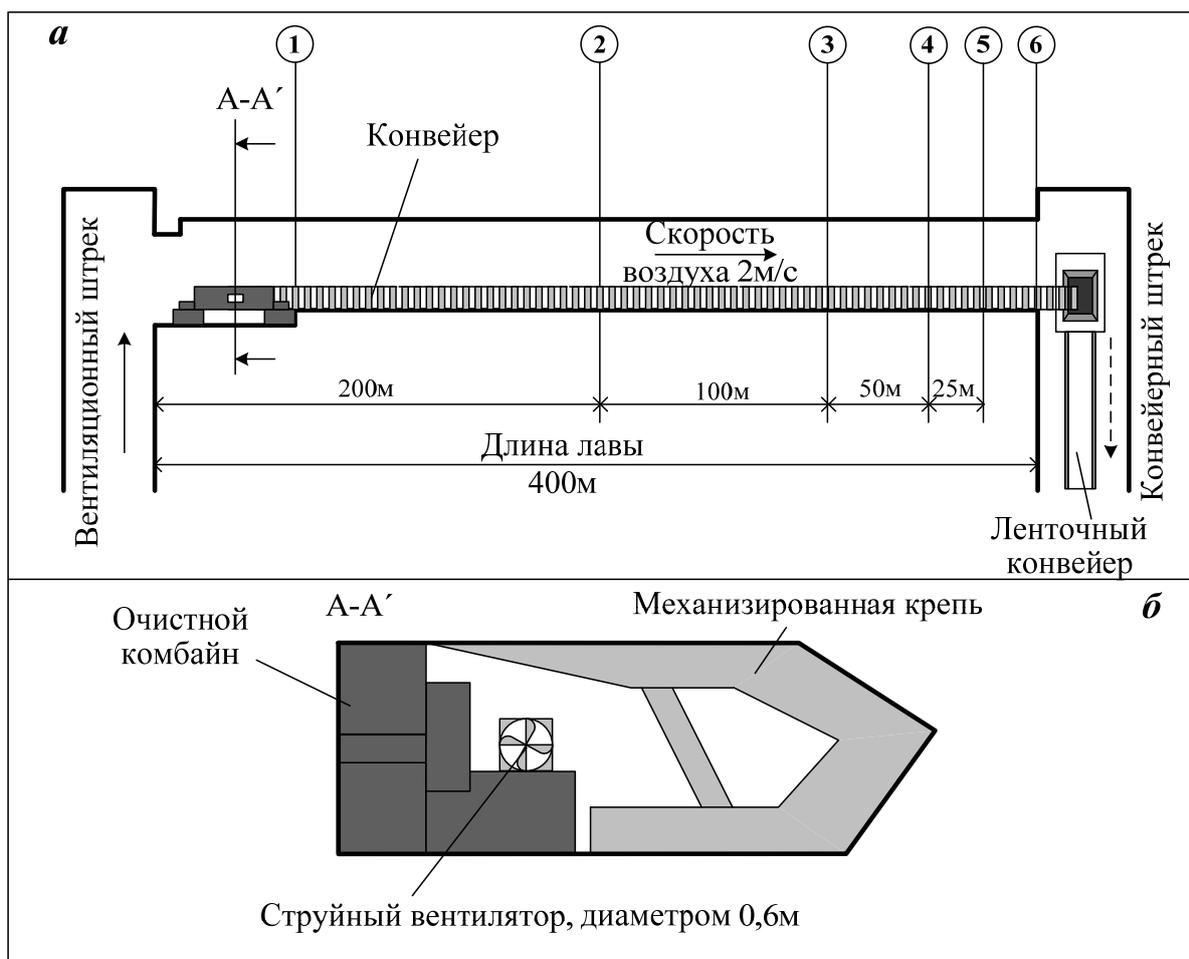


Рис. 1. Схема добычного участка (а), с указанием загромождения сечения лавы очистным механизированным комплексом (б) и расположения позиций (1-6) очистного механизированного комплекса по длине лавы

Для моделирования двухфазного течения есть два основных подхода [17]: Лагранжевы и Эйлеровы модели. В основе Лагранжева подхода лежит рассмотрение движения отдельных частиц дисперсной фазы. В основе Эйлерова подхода лежит рассмотрение изменений параметров течения (скоростей, давлений, температур) в точках пространства. Также существуют гибридные модели, в которых чередуются Лагранжев и Эйлеров подход. В гибридных моделях вводится

усреднение по пространству и переход от реального распределения частиц к объемной доле.

Лагранжева модель DPM (Discrete Phase Model — модель дискретной фазы) подразумевает построение траекторий частиц дисперсной фазы в сплошной фазе на основе решения обыкновенных дифференциальных уравнений движения. Модель учитывает двухсторонний обмен импульсом и энергией частиц со сплошной фазой. Модель применима для небольших значений объемной концентрации частиц, когда взаимодействие частиц между собой учитывается опосредовано. Для более точного учета взаимодействия частиц при увеличении концентрации используется гибридная модель DDPM (Dense Discrete Phase Model — модель плотной дискретной фазы). Модель подразумевает, что частицы не накапливаются в какой-либо части расчетной области. Модель применима для любых течений с относительно небольшой концентрацией частиц, если нужно учесть разброс/изменение размеров частиц, образование вторичных частиц, взаимодействие со стенкой.

Решение поставленной задачи проводилось при помощи гибридного подхода, представленной в расчетном комплексе Ansys Fluent моделью DDPM, построенной как комбинация моделей Eulerian (полная Эйлеровая модель, т.н. модель взаимопроникающих сред) и DPM [17].

В качестве двух сред, моделируемых в исследовании, принимались воздух и антрацитная пыль. Дисперсность пыли задавалась распределением Розина-Раммлера в диапазоне от 5 до 100 мкм, согласно [18] (рис.2).

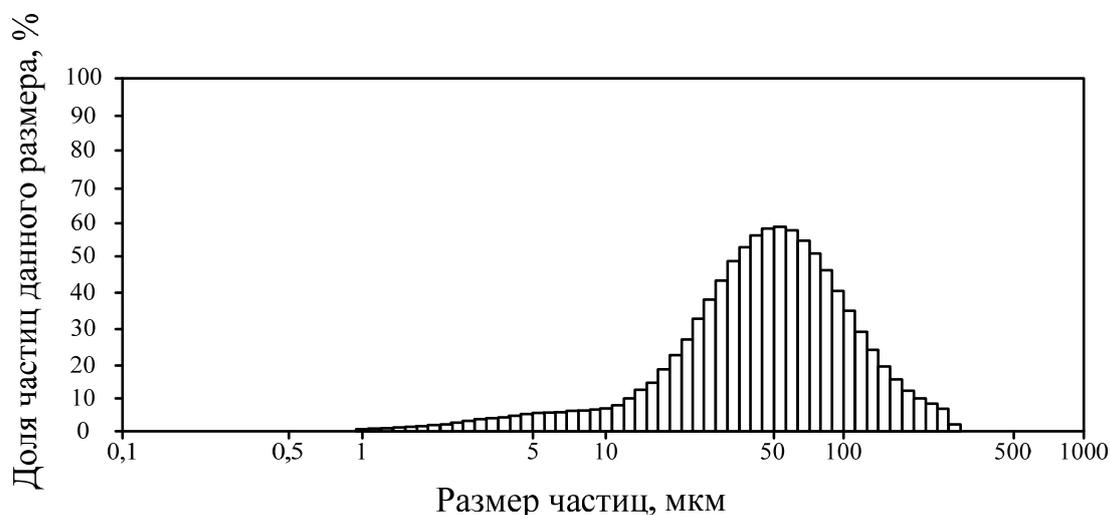


Рис. 2. Гистограмма фракционного распределение частиц пыли

При решении задачи исследования, были приняты следующие допущения: не учитывались системы орошения и пылеподавления от отбитого угля; принято, что со всех поверхностей потоком воздуха срывается равномерно 15 % пыли; учитывалось только инерционное прилипание частиц пыли к поверхностям исследуемого участка.

## *Результаты*

В отличие от метановоздушных параметров, концентрацию угольной пыли сложно оценивать на исходящей из забоя струе, да и по длине лавы она будет существенно изменяться в зависимости от режима работы и расположения очистного комбайна (как основного источника пыли и возмущения воздушного потока). Какая-то часть пыли осаждается, другая переходит во взвешенное состояние, что затрудняет получение общих закономерности. По этой причине, основные измерения концентрации угольной пыли будут фиксироваться в сечениях рабочих зон машиниста комбайна и машиниста крепи.

Наибольшее по длительности время своего нахождения в лаве, очистной комбайн работает на «промежуточном» участке. Именно здесь элементы вентиляционной сети (такие как поворот из вентиляционного штрека в лаву, и, наоборот, из лавы в конвейерный штрек) оказывают наименьшее влияние на структуру струи приточного воздуха. Поэтому, рассмотрим изменения концентрации пыли в рабочих зонах, при расположении очистного комбайна в «промежуточной», близкой к центру, части лавы.

При обработке угольного пласта очистным комбайном, движущимся против струи приточного воздуха (рис.3), которая разделяется на два потока: один (более выравненный и мощный) движется между механизированной крепью и огораживающей конструкцией конвейера, а другой – между обнаженной поверхностью угольного пласта и конвейером. «Поток 2», подхватывает выделяемую от режущих шнеков комбайна пыль и уносит ее дальше. Через 20-30 метров массовая концентрация угольной пыли становится соизмерима с фоновым запылением от лавового конвейера.

Наиболее крупные частицы пыли (от 50 мкм и более), выделяемые от режущих шнеков комбайна, в основном сразу оседают на почве и конвейере, а более мелкие – разносятся с потоком воздуха по остальному объему выработки. Как видно из полученных результатов, значительная часть пыли оттесняется воздушным потоком к выработанному пространству, где она оседает на конструкциях механизированной крепи (рис.3).

Средняя массовая концентрация угольной пыли в сечениях А-А' и Б-Б' составляет 328-333 мг/м<sup>3</sup>. Непосредственно в области нахождения горнорабочих массовая концентрация находится в пределах от 90 до 140 мг/м<sup>3</sup>. Эти значения соответствуют ТДУ.

При движении очистного комбайна, в попутном направлении с приточной струей воздуха (рис.4), струя разделяется на два потока: один движется между механизированной крепью и огораживающей конструкцией конвейера, а другой – между обнаженной поверхностью угольного пласта и конвейером. Однако, в этом случае более выравненным является поток 2 между обнаженной поверхностью угольного пласта и конвейером, который подхватывает пыль от режущих шнеков комбайна и уносит ее дальше, вынося из рабочей зоны большее количество частиц пыли.

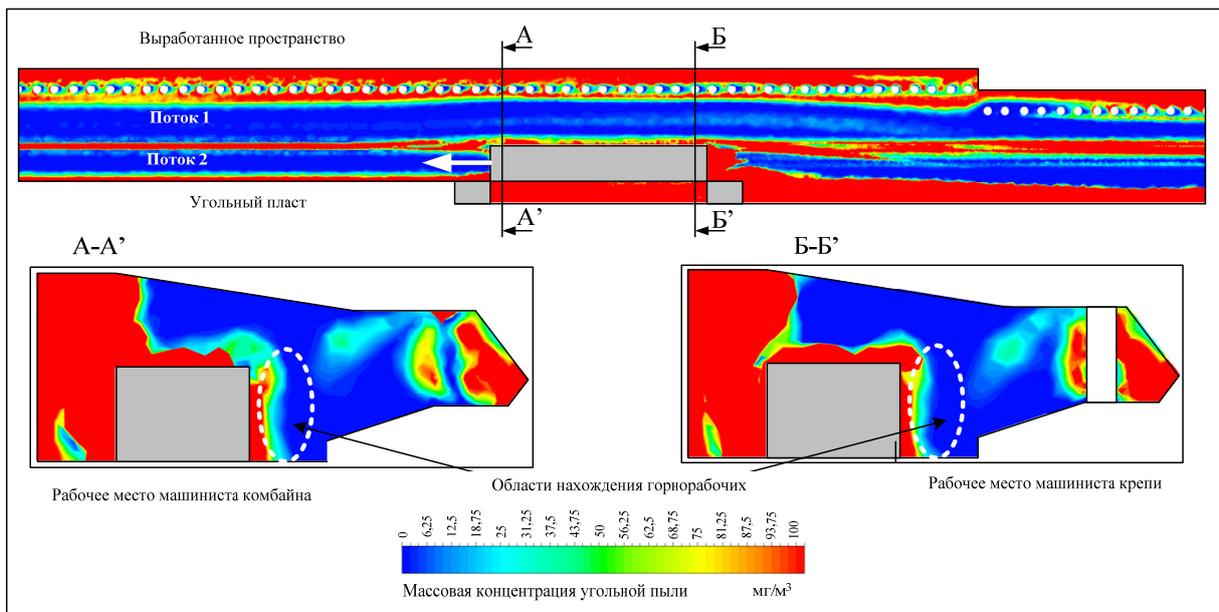


Рис. 3. Массовая концентрация угольной пыли на рабочих местах машинистов комбайна и крепи при движении очистного комбайна против направления потока воздуха

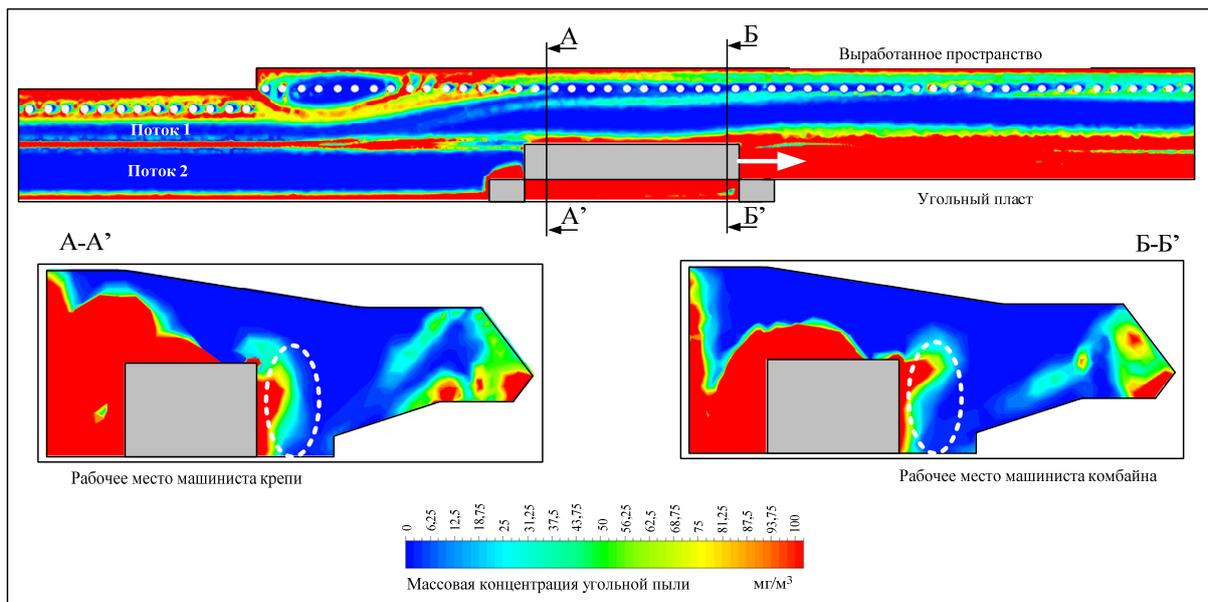


Рис. 4. Массовая концентрация угольной пыли на рабочих местах машинистов комбайна и крепи при движении очистного комбайна в попутном направлении с потоком воздуха

За счет изменения структуры поля скоростей воздушного потока 1 – меньшая доля угольной пыли вытесняется к выработанному пространству, по сравнению с вариантом движения комбайна в противоположном направлении (рис.3).

Средняя массовая концентрация угольной пыли в сечениях А-А' и Б-Б' составляет 176-245 мг/м<sup>3</sup>. Непосредственно в области нахождения горнорабочих

массовая концентрация находится в пределах от 90 до 140 мг/м<sup>3</sup>. Эти значения соответствуют ТДУ.

Работа струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне, способствует увеличению скорости потока воздуха и возникновению дополнительных вихрей (рис.5). Часть этих вихрей выносит запыленность от границы с выработанным пространством. Основной же поток воздуха от струйного вентилятора способствует снижению уровня запыленности за очистным комбайном, вынуждая тяжелые частицы пыли (от 50мкм и более) выделяемые от режущих шнеков, в основном оседать на почву и конвейер.

Тем самым, средняя массовая концентрация угольной пыли в исследуемых сечениях А-А' и Б-Б' снижается на 13,8-17,7 %, до значений 270 – 287 мг/м<sup>3</sup>. В области нахождения машинистов комбайна и крепи массовая концентрация находится в пределах от 90 до 140 мг/м<sup>3</sup>. Эти значения соответствуют ТДУ.

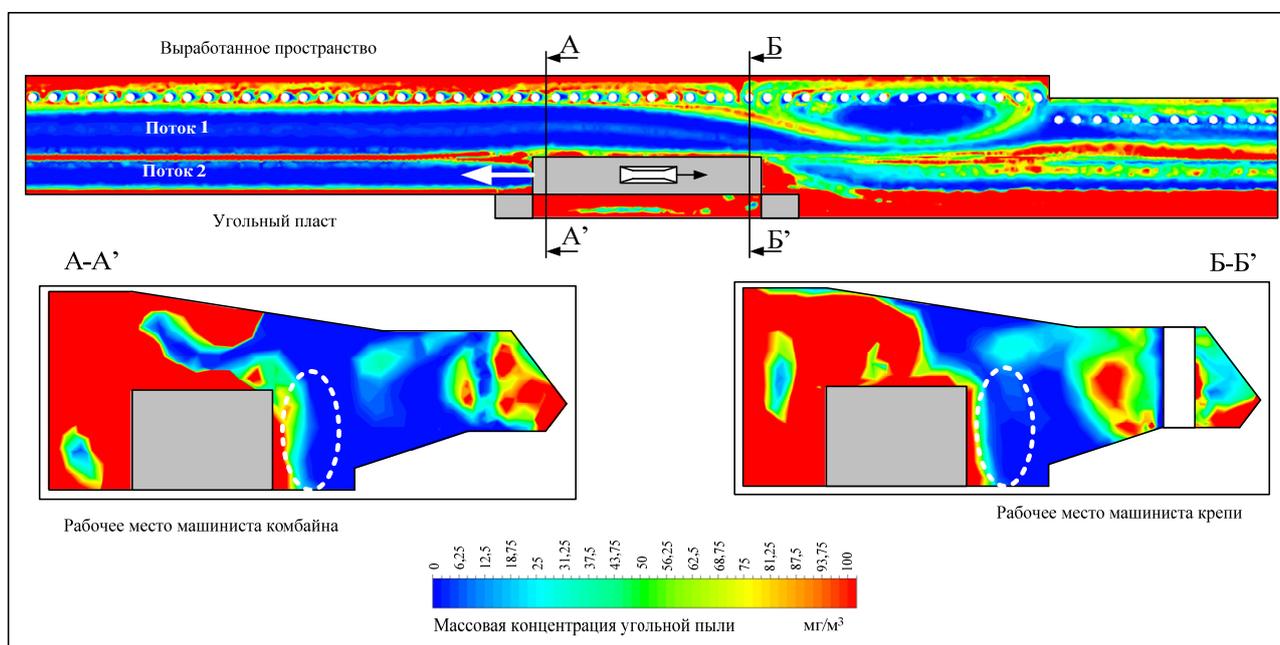


Рис. 5. Массовая концентрация угольной пыли на рабочих местах машинистов комбайна и крепи при движении очистного комбайна против направления потока воздуха, с учетом работы струйного вентилятора

Наилучшего результата по снижению массовой концентрации угольной пыли в очистной выработке удастся достичь при работе струйного вентилятора, когда комбайн движется в попутном направлении с приточной струей воздуха (рис.6). В этом случае, струйный вентилятор работает в режиме «воздуходувки», сдувая до 80% пыли, находящейся во взвешенном состоянии вблизи работающего комбайна. Побочные завихрения потоков воздуха выносят наибольшую часть угольной пыли от границы с выработанным пространством, а прямой поток от струйного вентилятора способствует осаждению частиц от режущих шнеков комбайна в основном на конвейер.

При этом средняя массовая концентрация угольной пыли в исследуемых сечениях А-А' и Б-Б' снижается на 34,1-36,7 %, до значений 116 – 155 мг/м<sup>3</sup>. В области нахождения машинистов комбайна и крепи массовая концентрация находится в пределах от 57 до 100 мг/м<sup>3</sup>. Эти значения соответствуют ТДУ.

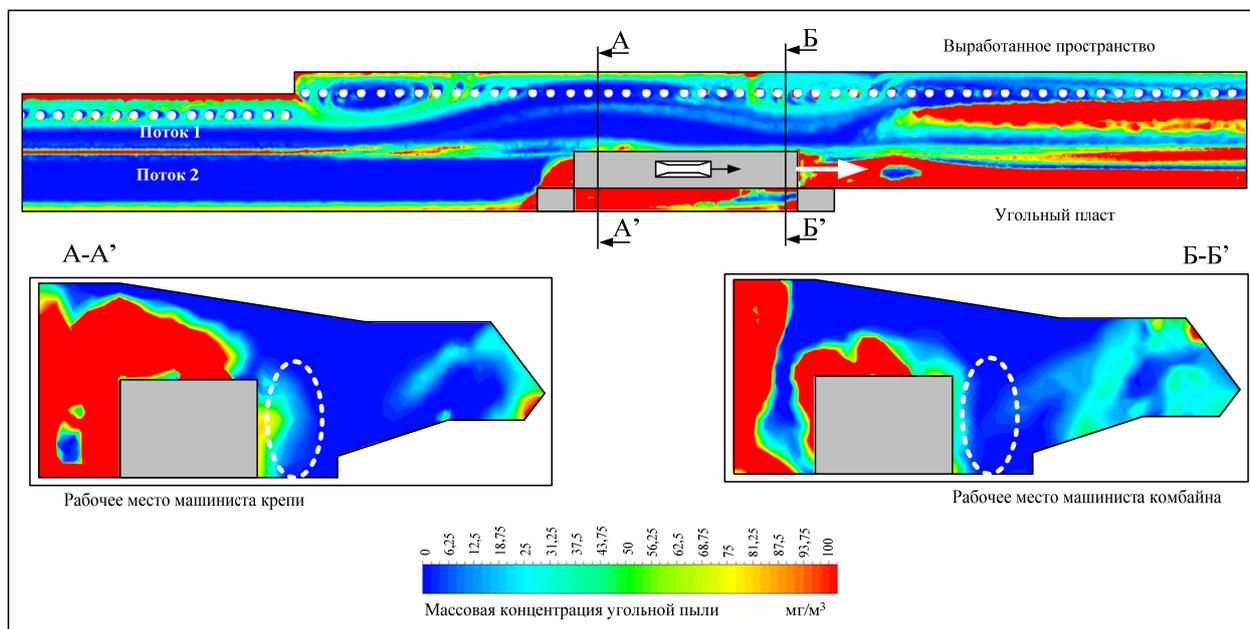


Рис. 6. Массовая концентрация угольной пыли на рабочих местах машинистов комбайна и крепи при движении очистного комбайна в попутном направлении с потоком воздуха, с учетом работы струйного вентилятора

### ***Заключение***

Обоснована технология вентиляции сверхдлинной угольной лавы с использованием струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне. Показано, что в большинстве типовых очистных выработках такой способ проветривания позволяет снизить среднюю массовую концентрации угольной пыли в окрестностях работающего очистного комбайна на 13,8-36,7%.

### ***Благодарности***

Данная статья написана по результатам исследований, выполненных в рамках проекта ФНИ (№ гос. Регистрации 121052500147-6).

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Бюллетень «Состояние условий труда работников, осуществляющих деятельность по сельскому хозяйству, охоте, лесному хозяйству, добыче полезных ископаемых, в обрабатывающих производствах, по производству и распределению электроэнергии, газа и воды, в строительстве, на транспорте и в связи Российской Федерации в 2015 году». Том 1. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), Главный межрегиональный центр (ГМЦ), опубликовано 25.04.2016. – 106 с.

2. ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны», утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 13 февраля 2018 года №25 – 176 с.
3. ГОСТ Р ИСО 7708-2006 «Качество воздуха. Определение гранулометрического состава частиц при санитарно-гигиеническом контроле» Дата введения 01.11.2006 – М.: «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем». – 2006. – 16 с.
4. Нецепляев М.И. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин и др. – М.: Недра, 1992. – 298 с.
5. Нецепляев В.И., Петрухин П.М., Кравец В.М. Гидрозащита от взрывов угольной пыли в шахтах. – К.: Техника, 1980. – 131 с.
6. Петрухин П.М., Нецепляев М.И., Киреев А.М. Предупреждение взрывов угольной пыли в конвейерных выработках. // Современные способы борьбы с пылью. Донецк: ЦБТИ МУП УССР – МакНИИ, 1967. – С. 60 – 62.
7. Chandan I. S., Singhal R. K. Dust Suppression in Mines. – Colliery Guardian, 1965, vol 210, №5413, p. 91 – 95.
8. Качан В.Н., Саранчук В.И., Данилов А.Т. Предупреждение взрывов угольной пыли в глубоких шахтах. – К.: Техника, 1990. – 120 с.
9. Стуканов В.И., Иванов В.Н., Логинов С.М.. Очистка рудничного воздуха от пыли при конвейерной доставке руды. // Вентиляция шахт и рудников. – Л.: 1983. – Вып.10. – С. 84 – 87.
10. Johan-Essex, V., Keles, C., Rezaee, M., Scaggs-Witte, M., Sarver, E. Respirable coal mine dust characteristics in samples collected in central and northern Appalachia. Int. J. Coal Geol. 2017, vol. 182, P. 85-93.
11. Korneva M.V. Assessment of the dust load on the respiratory organs of workers in coal mines, taking into account the dispersed composition of the dust aerosol / M.V. Korneva, G.I. Korshunov // Scientific Reports on Resource Issues Volume 1, 2017. – P. 416-421.
12. Organiscak J.A. Surface mine dust control / J.A. Organiscak, S.J. Page, A.B. Cecala, F.N. Kissell // In: Kissell FN, ed. Handbook for dust control in mining. Pittsburgh, PA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication – 2003. – № 147. – P. 73–81.
13. Pope C.A. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution / C.A. Pope, R.T. Burnett, M.J. Thun, E.E. Calle, D. Krewski, K. Ito, G.D. Thurston // JAMA – 2002 – №287(9) – P. 1132-1141.
14. Пат. 2701900 РФ. Способ вентиляции угольной лавы / А. М. Красюк, И. В. Лугин, С. А. Павлов и др. // Опубл. в БИ. — 2019. — № 28.
15. Павлов С.А. Интенсификация проветривания сверхдлинных угольных лав при использовании струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне / С.А. Павлов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, № 2. – С. 216-222.
16. Павлов С.А. Проветривание призабойного пространства протяженной тупиковой выработки за счет эжекционного эффекта, возникающего при установке продольной перегородки / С. А. Павлов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 260-266.
17. Батурин О.В., Батурин Н.В., Матвеев В.Н. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent // Самара: Изд-во Самар. гос. аэро-косм. ун-та, 2009. – 151 с.
18. Кобылкин А. С. Исследования пылераспределения в очистном забое у комбайна / А. С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 6-1. – С. 65-73

*С. А. Павлов*

## **Технические решения для повышения безопасности на путях эвакуации метрополитена**

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: pavlov\_s\_a@inbox.ru

**Аннотация.** При возникновении чрезвычайной ситуации и задымлении на подземных станциях метрополитена система тоннельной вентиляции должна обеспечить эвакуирующихся людей притоком наружного воздуха. Существующие архитектурно-строительные решения станций не всегда позволяют выдерживать требования нормативных документов по необходимой скорости воздуха на путях эвакуации. В статье представлены результаты исследования дополнительных технических решений, направленных на увеличение количества воздуха, поступающего в кассовый зал. Результаты получены при моделировании процесса воздухораспределения в программном комплексе Ansys Fluent. Выявлено, что применение воздушных клапанов («форточек») над дверными проемами позволяет увеличить количество приточного воздуха на 39%. А применение установленных дымозащитных припортальных завес позволяет увеличить количество воздуха на путях эвакуации до 3,5 раз за счет локализации дымоудаления в пределах станции.

**Ключевые слова:** метрополитен, воздухораспределение, аэродинамическое сопротивление, задымление, вентиляционные клапаны, вентиляционные завесы, моделирование, безопасность

*S. A. Pavlov*

## **A method for reducing the concentration of methane in very long coal longwall using jet fan installed on a shearer**

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia  
\* e-mail: pavlov\_s\_a@inbox.ru

**Abstract.** In the event of an emergency situation and smoke at underground metro stations, the tunnel ventilation system should provide evacuating people with an influx of fresh outdoor air. The existing architectural and construction solutions of the stations do not always allow them to withstand the requirements of regulatory documents on the required air velocity at evacuation routes. The article presents the results of a study of technical solutions aimed at increasing the amount of air entering the lobby. The results were obtained by modeling the air distribution process in the Ansys Fluent software package. It was found that the use of air valves over doorways can increase the amount of supply air by 39%, and the installation of portal curtains by 3,5 times.

**Keywords:** subway, air distribution, aerodynamic resistance, smoke, ventilation valves, ventilation curtains, modeling, safety

## ***Введение***

Система вентиляции метрополитена необходима для удаления вредных веществ, которые могут накапливаться в подземных сооружениях, а также для поддержания в них комфортных микроклиматических условий. Важным параметром системы вентиляции является количество подаваемого и удаляемого воздуха. Этот показатель должен соответствовать нормативным требованиям [1].

В случае пожара и задымления в подземных сооружениях метрополитена система тоннельной вентиляции должна обеспечивать условия безопасной эвакуации пассажиров и персонала [2-6]. При горении вагона метropоезда на станции дым распространяется неравномерно в платформенном зале. Возле очага возгорания будет более интенсивное задымление участка платформы, чем на остальной её части. Направление потоков воздуха будет оказывать основное влияние на распространение дыма как по платформе, так и в тоннеле. Конструктивные особенности и планировочные решения станций также существенно влияют на обеспечение требуемой скорости воздуха, которая необходима для предотвращения задымления путей эвакуации. Применение вентиляционных усановок большего размера и мощности не всегда возможно и рационально. Поэтому обоснование дополнительных технических решений с целью увеличения количества воздуха на путях эвакуации для существующих и проектируемых подземных станций метрополитена является актуальной задачей [7, 8].

## ***Методы и материалы***

Проводя анализ участков вентиляционной сети метрополитенов, по которым воздушный поток движется от поверхности к кассовому залу и платформе станции, выявлены участки с большим аэродинамического сопротивления. Наибольшее аэродинамическое сопротивление на путях движения воздуха создают входные двери в вестибюлях кассовых залов. Стоит сразу учесть и тот факт, что в некоторых регионах России в холодный период, около шести месяцев в году, двери установлены в два ряда для поддержания нормативных микроклиматических условий на рабочих местах персонала.

Основным нормативным документом, регламентирующим безопасность людей при эксплуатации метрополитенов, является Свод Правил СП 120.13330.2022 «Метрополитены» [1]. В случае возникновения чрезвычайной ситуации (задымления), согласно п. 5.16.5.5 СП [1], компенсация удаляемого воздуха системой вытяжной противодымной вентиляции из пассажирских зон станции допускается за счет естественного притока воздуха через открытые двери в кассовых залах и входных павильонах над лестничными сходами вестибюлей станций. Дополнительно в п. 5.16.5.14 СП [1] отмечается, что при расчетах следует учитывать наличие остановленных в тоннелях поездов и открытое положение дверей вестибюлей станций на выходах.

Рассмотрим результаты исследования воздухораспределения в вентиляционной сети метрополитена в зависимости от аэродинамического сопротивления на входах в вестибюли кассовых залов подземных станций.

При проведении вычислительных экспериментов в вентиляционной сети действующего метрополитена с помощью программ статического воздухораспределения [9, 10], значение аэродинамического сопротивления приоткрытых дверей вестибюля принимается постоянным значением (соответствующим углу их раскрытия около  $30^\circ$ ) [11, 12]. Это обусловлено тем, что «штатно» двери находятся значительное время в приоткрытом положении от воздействия работы тоннельной вентиляции и «поршневого эффекта» (рис. 1*а*). В момент возникновения чрезвычайной ситуации техногенного характера (задымления в подземных сооружениях) поезда останавливаются. В наиболее неблагоприятных ситуациях остановившиеся составы метропоездов перекрывают большую часть поперчного сечения тоннелей, делая малоэффективной работу венткамер. При этом двери на входах в кассовые залы самостоятельно возвращаются в закрытое положение под действием доводчиков. По этой причине, в некоторых метрополитенах у контролеров есть инструкция принудительно открыть и зафиксировать двери в максимально открытом положении.

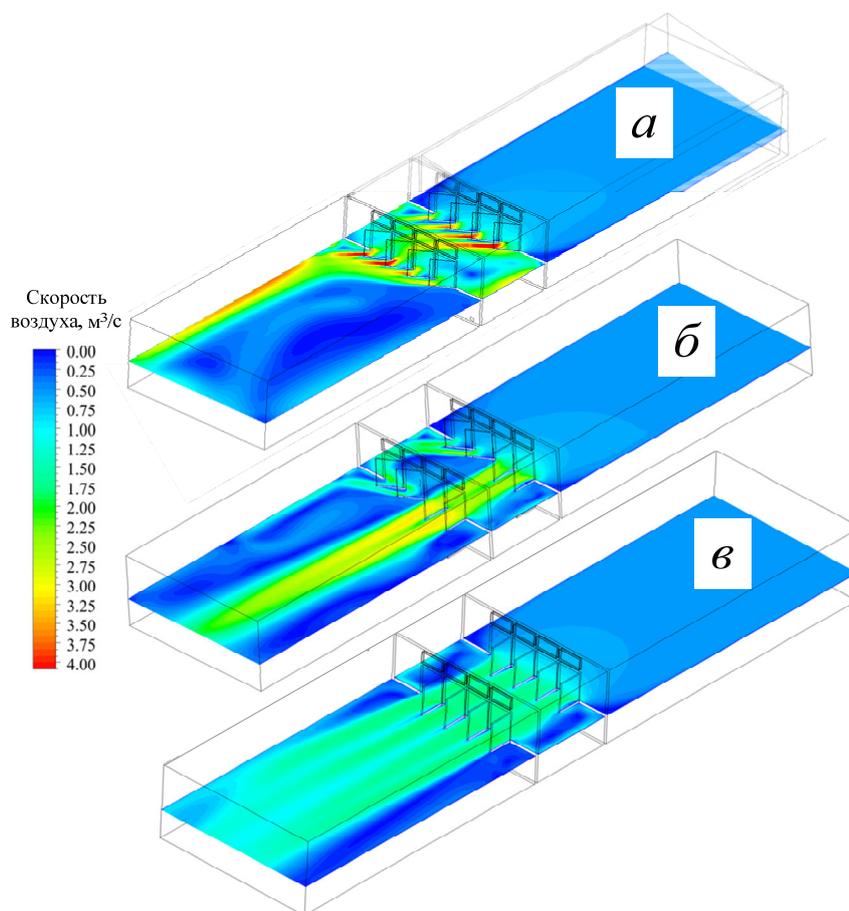


Рис. 1. Поле скоростей воздушного потока, при перемещении из подземного перехода в кассовый зал: *а*) при угле раскрытия дверей на  $30^\circ$ ; *б*) при раскрытии настежь двух из четырех пар дверей; *в*) при раскрытии настежь всех входных дверей

## Результаты

Далее рассмотрим изменения аэродинамических сопротивлений для перечисленных выше вариантов, согласно результатов аналитических расчетов по справочным данным [11, 13] и их сопоставление с результатами, полученными при моделировании методом конечных объемов в программном комплексе Ansys Fluent.

Согласно [13], сопротивление одного ряда из 4 дверей, приоткрытых на  $30^\circ$  по направлению движения потока воздуха, составляет 0,013552 кмюрг. В случае, когда расчет воздухораспределения в вентиляционных сетях метрополитенов делается для холодного периода года, сопротивление двух рядов дверей (рис. 1а), рассчитывается как последовательные местные сопротивления и увеличивается вдвое – 0,027104 кмюрг.

В расчете при помощи численной объемной модели в программном комплексе Ansys Fluent определено сопротивление одного ряда из четырех дверей – 0,014608 кмюрг. Расхождение результатов со справочными составило 7,8 %. Объясняется это расхождение тем, что в справочниках [11, 13] нет дверей как таковых, а есть аналогичный элемент вентиляционной сети со схожими параметрами. Тем не менее расчет в программном комплексе показал хорошую сходимость с аналитическими результатами [14, 15].

При расчете двух последовательных четырехдверных рядов была получена величина аэродинамического сопротивления – 0,032863 кмюрга (рис. 1а). Расхождение со справочным результатом в этом случае составило уже 21%. Объясняется это тем, что, используя только справочные данные не получится достоверно оценить взаимовлияние последовательных местных сопротивлений. «Продувка» объемной модели исследуемого участка вентиляционной сети в программном комплексе Ansys Fluent позволяет определять реальные аэродинамические сопротивления этих элементов, с учетом их взаимного влияния [14, 15].

Оценим влияние установки второго ряда дверей на количество воздуха, поступающего снаружи в кассовый зал. В качестве исходных данных принимаем аэродинамические сопротивления из результатов расчета в программном комплексе Ansys Fluent.

При установке второго ряда дверей, аэродинамическое сопротивление на входе в вестибюль увеличилось в 2,25 раза. Следовательно, при той же производительности вентиляторов, расход воздуха на пути эвакуации изменится следующим образом:

$$\begin{aligned}R_1 Q_1^2 &= R_2 Q_2^2; \\R_1 Q_1^2 &= 2,25 R_1 Q_2^2; \\Q_2 &= \sqrt{\frac{Q_1^2}{2,25}}; \\Q_2 &= 0,66 Q_1.\end{aligned}$$

где  $R_1$  – аэродинамическое сопротивление 1 ряда дверей, кмюрг;  $R_2$  – аэродинамическое сопротивление 2 последовательных рядов дверей, кмюрг;  $Q_1$  – расход воздуха через проемы 1 ряда дверей, м<sup>3</sup>/с;  $Q_2$  – расход воздуха через проемы двух последовательных рядов дверей, м<sup>3</sup>/с.

Как видно из представленных результатов, установка второго ряда из 4 дверей уменьшает количество поступающего на станцию воздуха на 34 %. В холодный период года, при установке второго ряда дверей на входе в вестибюль кассового зала, существенно снижается эффективность системы тоннельной вентиляции при возникновении задымления на станции.

Рассмотрим, как будет изменяться аэродинамическое сопротивление исследуемого участка вентиляционной сети при принудительном раскрытии входных дверей. Будет рассмотрено два варианта: когда открыто половина (две пары) дверей (рис. 1б) и когда открыты все (четыре пары) дверей под 90° (рис. 1в).

Как отмечалось выше, в некоторых метрополитенах нашей страны, у контролеров есть обязанность: в случае чрезвычайной ситуации на станции – принудительно открыть и фиксировать клинья входные двери, чтобы обеспечить беспрепятственную эвакуацию пассажиров и увеличить приток свежего воздуха им на встречу. Предположим, что, в силу человеческого фактора, не все двери получилось подклинить в открытом положении (или часть клиньев выскочили, от действий эвакуирующихся пассажиров) и сравним полученные результаты с вариантом, когда два четырехдверных ряда лишь приоткрыты штатно на 30° (рис. 1а).

Согласно расчетам, в программном комплексе Ansys Fluent, аэродинамическое сопротивление такого элемента вентиляционной сети (две пары открытых дверей) составит 0,008493 кмюрг, что на 74,2 % меньше «штатно» приоткрытых дверей. Подклинивание половины дверей в открытом положении позволит увеличить расход воздуха поступающего на станцию на 49%.

Аэродинамическое сопротивление полностью раскрытых (4 пар) дверей (рис. 1в), согласно расчетам, получается равным – 0,002468 кмюрг. Это на 92,5 % меньше «штатно» приоткрытых дверей, что увеличит количество наружного воздуха навстречу эвакуирующимся пассажирам на 73%.

Еще одним решением по снижению аэродинамического сопротивления исследуемого участка на входе в вестибюль кассового зала является раскрытие «форточек» (рис. 2) или воздушных клапанов (жалюзийных затворов) над дверными проемами.

Проведенные расчеты в программном комплексе Ansys Fluent, показали, что раскрытие форточек, приведет к снижению аэродинамического сопротивления исследуемого участка до значения 0,012317 кмюрг. Это позволит увеличить приток воздуха навстречу эвакуирующимся людям на 39 %. Фактически, 4 открытые «форточки» соизмеримы по сопротивлению с целым рядом дверей (их величина составляет 0,014608 кмюрг).

Когда пассажиры, покидающие задымленную станцию метро, чередой проходят через входные двери – они временно создают дополнительное сопротивление потокам воздуха. При открытых «форточках» воздух беспрепятственно

поступает на станцию, обеспечивая устойчивую его скорость на пути эвакуации в припотолочной зоне, на всем ее протяжении. Через дверные проемы скорость приточного воздуха снижается, тем самым уменьшая препятствующее дутью в лица эвакуирующимся людям с 4 до 2 м/с, ускоряя процесс их выхода в безопасную зону.

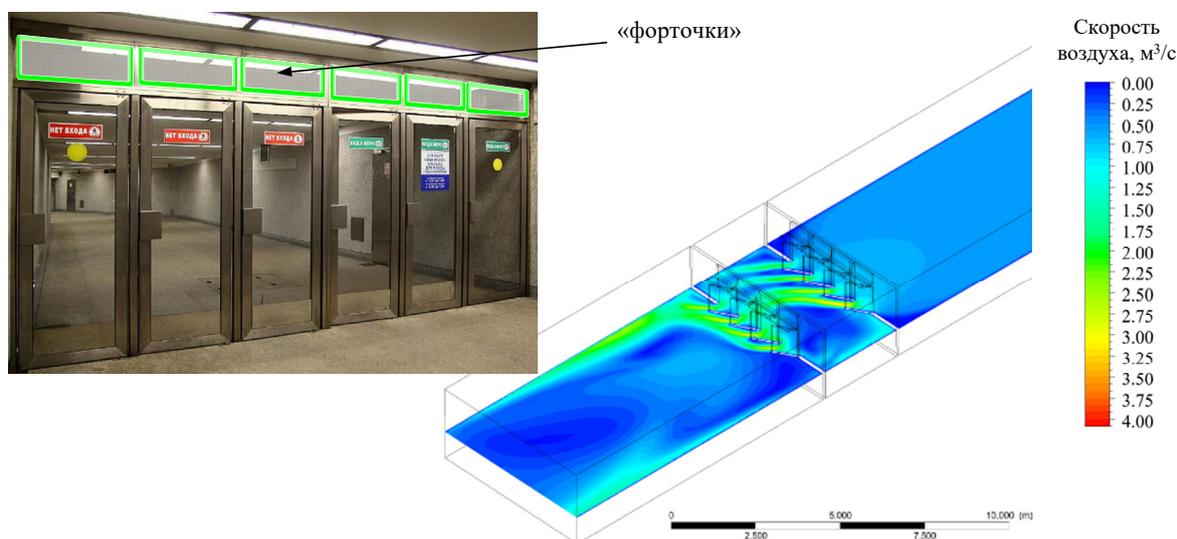


Рис. 2. Фотография входных дверей с «форточками», которые рекомендуется открывать в автоматическом режиме и поле скоростей потока воздуха при открытии таких «форточек» над дверными проемами

*Дымозащитные завесы на порталах путевых тоннелей для обеспечения условия их незадымления*

Согласно СП [1], при возгорании поезда на станции, необходимо средствами тоннельной вентиляции не допустить задымления перегонных тоннелей. В реальности же, любое сильное задымление в платформенном зале приведет к частичному проникновению дыма в примыкающие к нему путевые тоннели, как минимум до границы перегонных венткамер (так как они тоже участвуют в реализации режима аварийной вентиляции и включены на вытяжку).

Наиболее перспективным решением этой задачи является локализация дыма в пределах станции путем установки физической преграды на пути его движения в тоннель из легкоразрушаемых дымозащитных завес. Место установки таких быстровозводимых завес должно быть определено исходя из следующих условий: препятствовать проникновению дыма вглубь путевого тоннеля; не препятствовать проходу людей; не создавать помех воздухозаборникам станционной венткамеры, удаляющей продукты горения из платформенного зала.

Рассмотрим применение таких перегородок на пилонной станции глубокого заложения (глубина более 40м от поверхности), на которой воздухозабор стан-

ционной венткамеры осуществляется в платформенном зале, возле порталов путевых тоннелей (рис. 3).

Учитывая, что в решении поставленной задачи нет необходимости учитывать стратификацию потоков воздуха по сечениям, то ее решение можно осуществить при помощи сетевой математической модели воздухораспределения в метрополитене на обобщенной линии, состоящей из девяти станций [8]. Девять станций принимается из расчета, что исследования ведутся на промежуточной (пятой) станции, равноудаленной от тупиковых (первой и девятой), чтобы избежать воздействия тупиковых участков на результаты расчетов.

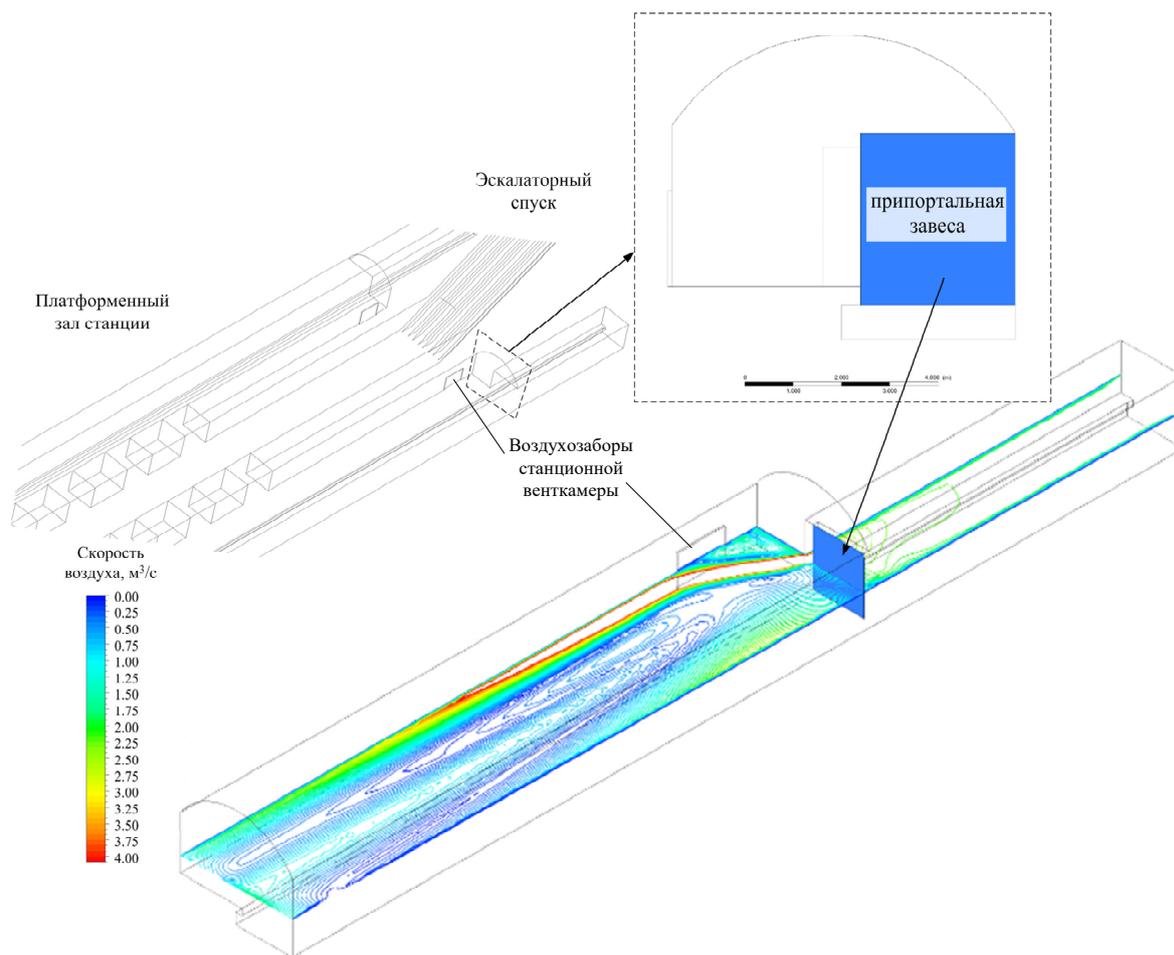


Рис. 3. Место установки припортальной завесы и поле скоростей воздуха, перемещающегося из тоннеля на станцию пилонного типа, при ее закрытии

На исследуемой станции, быстровозводимая противодымная завеса опускается с верхней части портала путевого тоннеля до уровня пола платформы. При этом служебный вход на мостки остается не заблокирован для перемещения персонала, и на путях необходимо оставить возможность миновать опущенную завесу (пройдя под ней).

Путевые тоннели имеют небольшое аэродинамическое сопротивление в сравнении с другими участками вентиляционной сети метрополитена. При работе вентилятора в режиме дымоудаления почти 4/5 воздуха затягивается в воздухозабор из путевых тоннелей (рис. 3а).

Для более достоверных расчетов в сетевой модели воздухораспределения, необходимо корректно определить аэродинамические параметры предлагаемых дымозащитных завес. Поскольку аналитическим способом определить аэродинамическое сопротивление порталной завесы не представляется возможным – проведем расчет на объемной модели, методом конечных объемов в программном комплексе Ansys Fluent (рис. 3).

Аэродинамическое сопротивление одной быстровозводимой завесы, закрывающей большую часть сечения портала путевого тоннеля от проникновения дыма, составляет 0,004461 кмюрг, что в 40 раз больше сопротивления исследуемого участка тоннеля.

При срабатывании системы пожарной сигнализации, автоматическое раскрытие дымозащитных завес на порталах существенно увеличивает сопротивление этих участков, тем самым способствуя увеличению скорости воздуха на путях эвакуации пассажиров через входные двери вестибюлей.

На рис. 4 стрелками показано направление движения воздуха, а цифрами – фактический расход воздуха и процентное соотношение его количества. Из тоннелей воздух не попадает на платформу, а сразу движется в станционную вентиляционную камеру, так как воздухозаборы чаще всего устанавливаются с двух торцов платформенного зала. Поэтому, необходимо учитывать, что в холодный период года (подразумевается время, когда устанавливается два ряда дверей на входе в кассовый зал) около 14 % воздуха, перемещаемого станционным вентилятором, поступает на платформу через лестничные, оставшихся 86 % осуществляют проветривание перегонных тоннелей и сразу удаляются на поверхность, не попадая в платформенный зал, где находится очаг задымления.

Кроме того, необходимо учитывать, что со временем вентиляционная сеть метрополитенов меняется (особенно это относится к интенсивно строящимся метрополитенам). Поскольку она представляет собой связанную систему, в которой изменение параметров работы вентиляторов влияет на воздухораспределение в разных точках сети. Практика показала, что при попытке настроить режим работы вентилятора на одной из станций изменяются расходы воздуха на всех станциях линии метрополитена. Поэтому всегда требуется корректировать настройку вентиляционного оборудования на всей линии [7].

Рассмотрим, какое влияние оказывает на воздухораспределение закрытие предложенных порталных противодымных завес в самом неблагоприятном состоянии обстоятельств – например, при возможном частичном отказе этого оборудования (рис. 4 а-д).

Из полученных результатов видно, что закрытие только одной порталной завесы (рис. 4б) не приводит к значительному изменению расходов (как и скорости) воздуха на путях эвакуации. Происходит лишь перераспределение воздушных потоков между закрытым и открытым тоннелями одного полуперегона. По-



ехал в платформенный зал и частично остался в путевом тоннеле – область перекрытия сечения тоннеля поездом сопоставима с припортальной перегородкой, как и аэродинамическое сопротивление этого участка вентиляционной сети.

Кроме того, закрытие четырех припортальных противодымных завес позволит локализовать работу аварийного режима вентиляции станции только за счет ее вентиляционных установок главного проветривания.

Таким образом можно сделать вывод, что при возникновении пожара на станции, необходимо предусмотреть установку припортальных быстропроводимых и легкоразрушаемых противодымных завес для локализации задымления в пределах платформенного зала и предотвращения проникновения дыма в путевые тоннели, что позволяет увеличить до 3,5 раз скорости воздуха на пути эвакуации пассажиров. При этом возведенные завесы не должны создавать преград воздухозаборам станционной венткамеры, удаляющим дым из внутреннего объема платформенного зала.

### ***Заключение***

1. Уточнено аэродинамическое сопротивление двух последовательных четырехдверных рядов на входе в кассовый зал, которое повышает точность расчета на 21%.

2. В проектируемых станциях метрополитена необходимо предусматривать «форточки» или вентиляционные клапаны в створах дверей, способных автоматически раскрываться при задымлении платформенного зала. Их наличие позволяет увеличить приток свежего воздуха навстречу эвакуирующимся на 39 %.

3. При чрезвычайной ситуации техногенного характера, необходимо обеспечить синхронное автоматическое раскрытие всех входных дверей, чтобы увеличить количество поступающего наружного воздуха навстречу эвакуирующимся. Эти мероприятия увеличат приток свежего воздуха в платформенный зал станции на 73 %.

4. Определено аэродинамическое сопротивление (0,004461 кмюрг) быстропроводимых противодымных завес вблизи порталов, позволяющих предотвратить проникновение дыма в путевые тоннели. При закрытии четырех припортальных завес, не создавая преград воздухозаборам станционной венткамеры, удаляющим задымление из внутреннего объема платформенного зала, возможно увеличить скорость воздуха на путях эвакуации до 3,5 раз.

### ***Благодарности***

Данная статья написана по результатам исследований, выполненных в рамках проекта ФНИ (№ гос. регистрации 121052500147-6).

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. СП 120.13330.2022 «СНиП 32-02-2003 Метрополитены». – Утв. приказом Минстрой РФ 27.12.2022 г. №1131/пр. – Введ. 28.01.2023г. – М., 2022г. – 302с.

2. Подойницын А.В. Система основной вентиляции Екатеринбургского метрополитена / А.В. Подойницын // Метро и тоннели - 2004. - № 4. - С. 40.

3. Монфред Е.В. Конференция по вопросам организации систем воздухообмена, контроля и управления микроклиматом, управления режимами вентиляции в экстремальных условиях в тоннелях и на станциях метрополитенов / Е.В. Монфред, В.Ф. Иванов // Метро - 1997. - № 6. - С. 43.
4. Коротков В.Н. Работа тоннельной вентиляции Петербургского метрополитена. Особенности состояния микроклимата / В.Н. Коротков // Метро и тоннели - 2004. - № 4. - С. 41.
5. Иванов С.А. Опыт ЭМС Московского метрополитена по обеспечению микроклимата на подземных объектах / С.А. Иванов // Метро и тоннели - 2004. - № 4. - С. 42-43.
6. Шерстнева Н.В. Контроль и организация воздухообмена в тоннеле и на станции Нижегородского метрополитена / Н.В. Шерстнева // Метро и тоннели - 2004. - № 4. - С. 38-39.
7. Красюк, А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов / А. М. Красюк ; А. М. Красюк ; отв. ред. Н. А. Попов ; Российская акад. наук, Институт горного дела. Сибирское отделение. – Новосибирск : Наука, 2006. – 163 с. – ISBN 5-02-032525-2. – EDN QNTEYX.
8. Красюк, А. М. Вентиляция метрополитенов / А. М. Красюк, И. В. Лугин ; Сибирское отделение РАН. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2018. – 316 с. – ISBN 978-5-7692-1629-9. – DOI 10.15372/VENTILATION2018KAM. – EDN YUNEVT.
9. Кузнецов А.С. О применении потоковых алгоритмов для расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях / А.С. Кузнецов, С.М. Лукин // ФТПРПИ. – 1989. – № 5. – С. 56-63.
10. Лукин С. М. Разработка математического и программного обеспечения расчета воздухо-распределения для автоматизированного управления проветриванием шахт и рудников / Дис. канд. техн. наук: 05.13.07/ С.М. Лукин; ИГД СО РАН. – Новосибирск, 1989. – 94 с.
11. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В.Я. Цодиков – М.: Недра, 1975. – 237 с.
12. Krasyyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. Experimental research into air distribution in a terminal subway station // Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 85, March 2019, P. 21–28.
13. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
14. Павлов, С. А. Оценка изменения величины местных аэродинамических сопротивлений элементов вентиляционной сети рудника при реверсивном режиме работы системы вентиляции / С. А. Павлов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2, № 4. – С. 212-219. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-2-4-212-219
15. Павлов, С. А. Об изменении аэродинамического сопротивления вентиляционной сети шахты при реверсировании воздушного потока / С. А. Павлов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 207-211. – DOI 10.15372/FPVGN2019060235

© С. А. Павлов, 2024

*А. А. Речкин\**

## **Оптимизация конструктивных параметров пневматической ударной машины со стационарно установленным упругим клапаном**

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: lexher68@gmail.com

**Аннотация.** Рассмотрена задача оптимизации конструктивных параметров пневматической ударной машины с эластичным клапаном с целью определения значений, при которых предударная скорость бойка ударной машины будет максимальной при заданных ограничениях на габаритные размеры механизма. Численная оптимизация проведена генетическим методом на одномерной имитационной модели пневматической ударной машины со стационарно установленным кольцевым упругим клапаном в форме усеченного конуса. Кратко описан генетический метод оптимизации. Получены значения параметров машины которые, при наложенных ограничениях, дают максимально возможную предударную скорость бойка ударной машины. Исходя из этих значений определены геометрические характеристики бойка ударной машины при заданной массе.

**Ключевые слова:** пневматическая ударная машина, эластичный клапан, оптимизация, предударная скорость

*А. А. Rechkin\**

## **Optimization of Design Parameters of the Pneumatic Impact Machine with Stationary Installed Elastic Valve**

Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: lexher68@gmail.com

**Abstract.** The problem of optimizing the design parameters of the pneumatic impact machine with an elastic valve is considered to determine the values at which the pre-impact velocity of the striker of the impact machine is maximum under given restrictions. Numerical optimization is carried out using the genetic method on a one-dimensional simulation model of the pneumatic impact machine with a stationary installed ring elastic valve, which have the shape of a truncated cone. The method of genetic optimization is described briefly. The values of the machine parameters are obtained which, under the imposed restrictions, give the maximum possible pre-impact velocity of the striker of the impact machine. Based on these values, the geometric characteristics of the striker of the impact machine at a given mass is determined.

**Keywords:** pneumatic impact machine, elastic valve, optimization, pre-impact velocity

### ***Введение***

Пневматические ударные машины широко применяются в горном деле и строительстве с середины прошлого века до наших дней. Они служат для забивания свай, проходки дегазационных и др. скважин, применяются при горизон-

тально направленном бурении для устройства подземных скважин в грунте и т.д. В последнее время в качестве элементов, управляющих потоком энергоносителя в пневматических ударных машинах стали применяться упругие элементы из резины, полиуретана и т.д. В 1990х годах в ИГД СО РАН были разработаны пневмомолоты «Тайфун» [1] с кольцевым управляющим упругим клапаном, которые зарекомендовали себя как надежные и эффективные машины и выпускаются по сей день. Кольцевой клапан служит для герметизации камеры обратного хода, установлен на бойке и движется вместе с ним. Во время обратного хода наружная поверхность клапана скользит по внутренней поверхности корпуса, что и обеспечивает герметизацию камеры обратного хода. Однако, при этом происходит трение клапана о корпус, вследствие чего уменьшается его ресурс.

В данной работе предложена конструктивная схема со стационарно установленным на наковальне упругим клапаном, имеющим коническую кольцевую форму (рис. 1.) Такая компоновка призвана уменьшить истирание клапана и, следовательно, увеличить межремонтный ресурс.

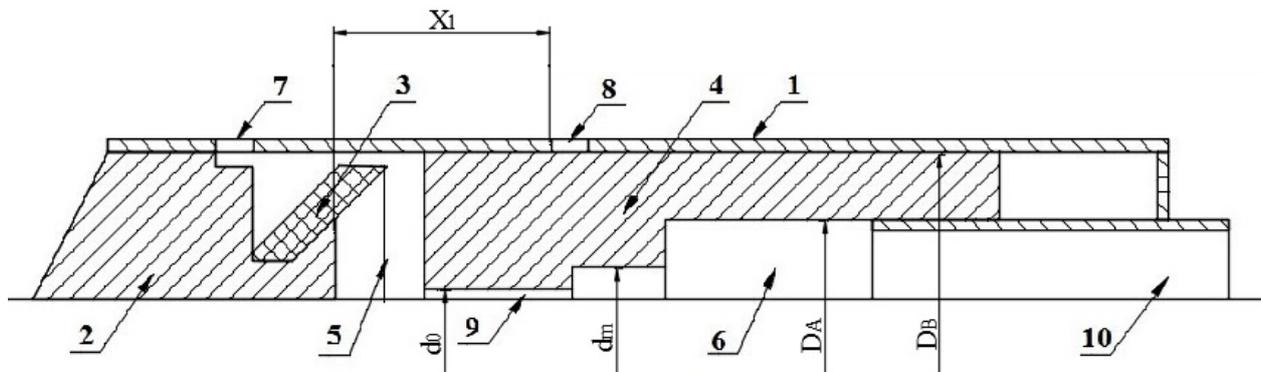


Рис. 1. Принципиальная схема ударной машины: 1 — корпус; 2 — наковальня; 3 — клапан; 4 — боек; 5 — камера обратного хода; 6 — камера прямого хода; 7 — первое выхлопное отверстие; 8 — второе выхлопное отверстие; 9 — межкамерный дроссель; 10 — подача воздуха

В работах [2-4] была дана оценка применимости такого клапана, выбрана рациональная форма и показано влияние сопротивления упругих сил клапана на энергетические характеристики.

### ***Методы и материалы***

Предварительный расчет рабочего цикла ударной машины, выполненной по такой схеме проведем, в программе одномерной симуляции. Расчетная схема представлена на рис. 2.

Будем предполагать, что:

- камера обратного хода герметизируется, как только передняя поверхность бойка соприкасается с контактной поверхностью клапана;

- давление в камере обратного хода на всем его протяжении удерживает клапан в закрытом состоянии и герметизирует камеру обратного хода;
- по достижении передней плоскостью бойка вторых выхлопных отверстий камера обратного хода разгерметизируется, клапан при отсутствии давления открывает первые выхлопные отверстия.

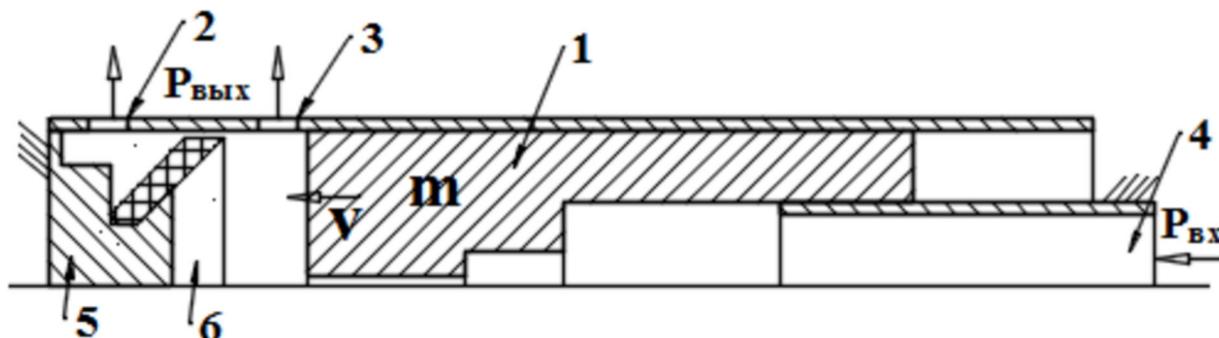


Рис. 2 Расчетная схема: 1 – боек ударной машины, 2 – первый выхлопной канал, 3 – второй выхлопной канал, 4 – подача воздуха, 5 – наковальня, 6 – упругий клапан

В данной программе мы не учитываем деформацию клапана под действием бойка и давления воздуха, а также изменение объема камеры при деформации клапана.

Имитационная модель задачи приведена на рис.3.

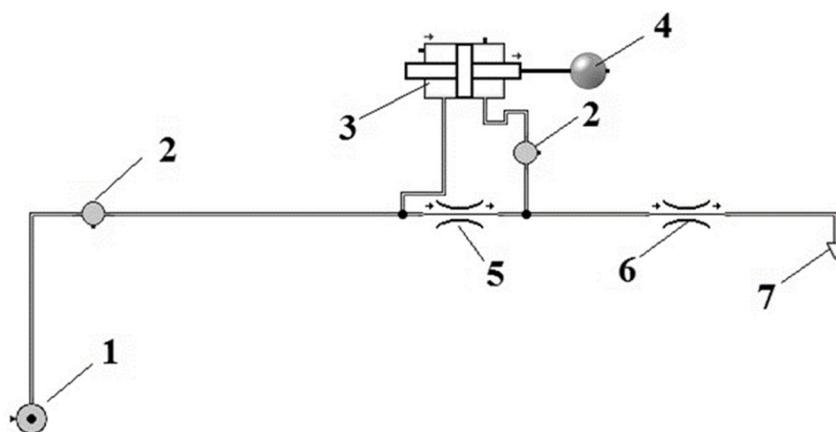


Рис. 3. Имитационная модель: 1- компрессор, 2 – объем воздуха в системе, 3 – пневмоцилиндр, 4 –масса бойка, 5 – межкамерный дроссель, 6 – выхлопной дроссель, имитирующий работу клапана, 7 – выхлоп.

Роль клапана играет управляющий дроссель, который закрыт от момента соприкосновения бойка с клапаном до конца обратного хода.

Задача состоит в определении рациональных параметров машины при которых достигается максимальная предударная скорость. Для этого проведем чис-

ленную оптимизацию, с помощью модуля, подключаемого к имитационной модели. Зафиксируем из конструктивных соображений наружный диаметр бойка  $D_b=0.078$  м и массу бойка  $m=6.1$  кг.

Смысл численной оптимизации состоит в поиске максимума предупредительной скорости при допустимых значениях варьируемых параметров и установленных ограничениях. Примем ограничение, что  $V_{max} < 4$  м/с. Варьировать будем следующие параметры:

- диаметр дросселя  $d_0$  от 0.001 до 0.006 м с шагом 0.001 м,
- диаметр бойка перед дросселем  $d_m$  от 0.010 до 0.026 м с шагом 0.001 м,
- диаметр камеры прямого хода  $D_A$  от 0.030 до 0.056 м с шагом 0.001 м,
- длину рабочего хода  $X_1$  от 0.045 до 0.05 м с шагом 0.001 м.

В качестве метода оптимизации был выбран генетический метод, показавший хорошую сходимость [5]. Генетический метод оптимизации относится к эволюционным алгоритмам, основанным на принципах биологической эволюции. Он использует механизмы естественного отбора, скрещивания и мутации для нахождения решения задачи оптимизации. На первом этапе задается инициализация популяции: создается начальная популяция решений, которая представляет собой набор случайно сгенерированных индивидов  $(d_0^0, d_m^0, D_A^0, X_1^0) \dots (d_0^K, d_m^K, D_A^K, X_1^K)$ , где K-размер популяции, каждый из которых представляет собой решение задачи. «Генами» являются здесь указанные выше варьируемые параметры, принадлежащие заданным промежуткам. Далее вычисляется функция приспособленности для каждого индивида в популяции (предупредительная скорость). Функция приспособленности определяет качество индивида. Выбор родительских индивидов происходит с учетом их приспособленности. Чем выше значение функции приспособленности, тем больше шансов у индивида быть выбранным в качестве родителя. Далее путем комбинирования «генов» родительских индивидов создается «потомство». Например, из двух «родителей» с индексами 2 и 4 создается потомство  $(d_0^2, d_m^4, D_A^2, X_1^4)$ ,  $(d_0^4, d_m^2, D_A^4, X_1^2)$ . Для обеспечения разнообразия в популяции и исключения преждевременной сходимости в потомство вводятся случайные изменения генов (мутации), например  $(d_0^4, d_m^4, D_A^4, X_1^2)$ , а старая популяция заменяется новой. Такой порядок действий повторяется до достижения условия остановки, которым может быть определенное значение функции приспособленности (в данном случае максимальной предупредительной скорости) или назначенное число опытов.

### **Результаты**

В результате расчетов (рис. 4) получим максимальную возможную предупредительную скорость  $V_{max} = 3.99$  м/с при следующих параметрах:  $D_A=0.055$  м,  $X_1=0.049$  м,  $d_0=0.006$  м,  $d_m=0.010$  м. Цифрами на графике показаны максимально возможные значения скорости, красными точками – значения, выходящие за ограничение.

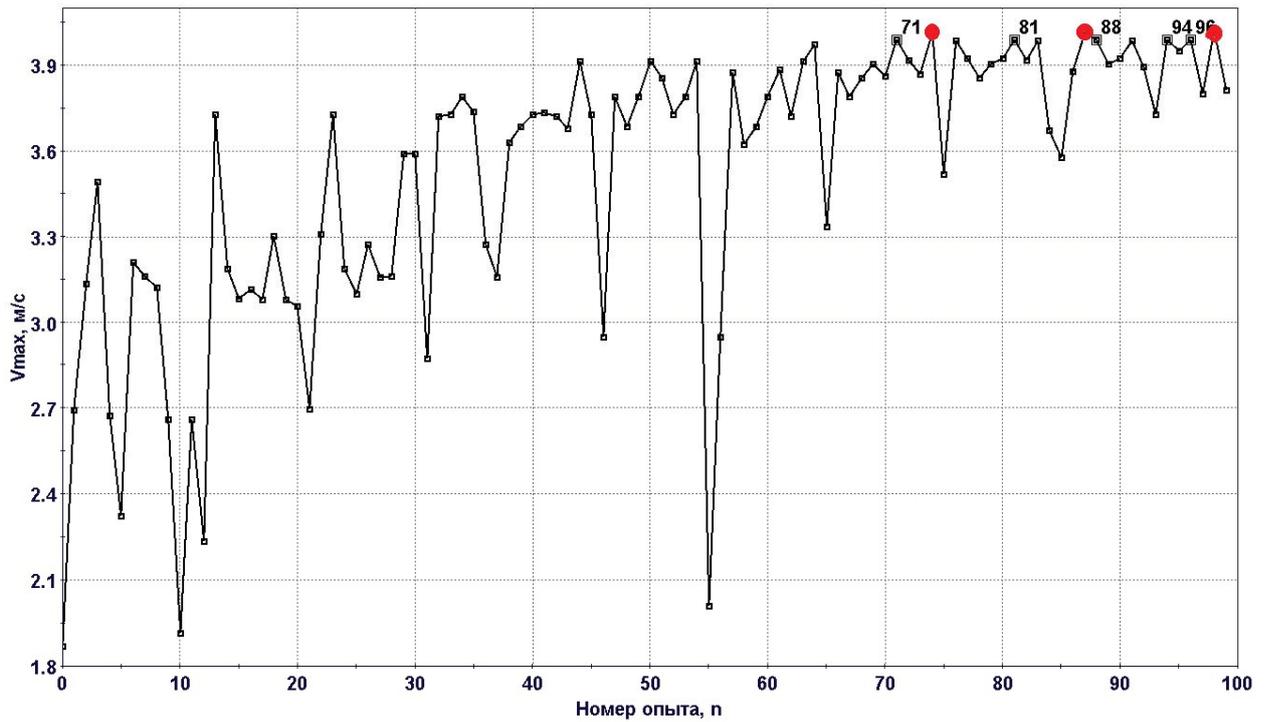


Рис. 4 График оптимизации.

Энергия удара при этом составит  $E = 48.561$  Дж. Проведем расчет ударной машины при найденных параметрах (рис. 5). Получим частоту ударов  $f = 17$  Гц, тогда ударная мощность составит 825.54 Дж/с.

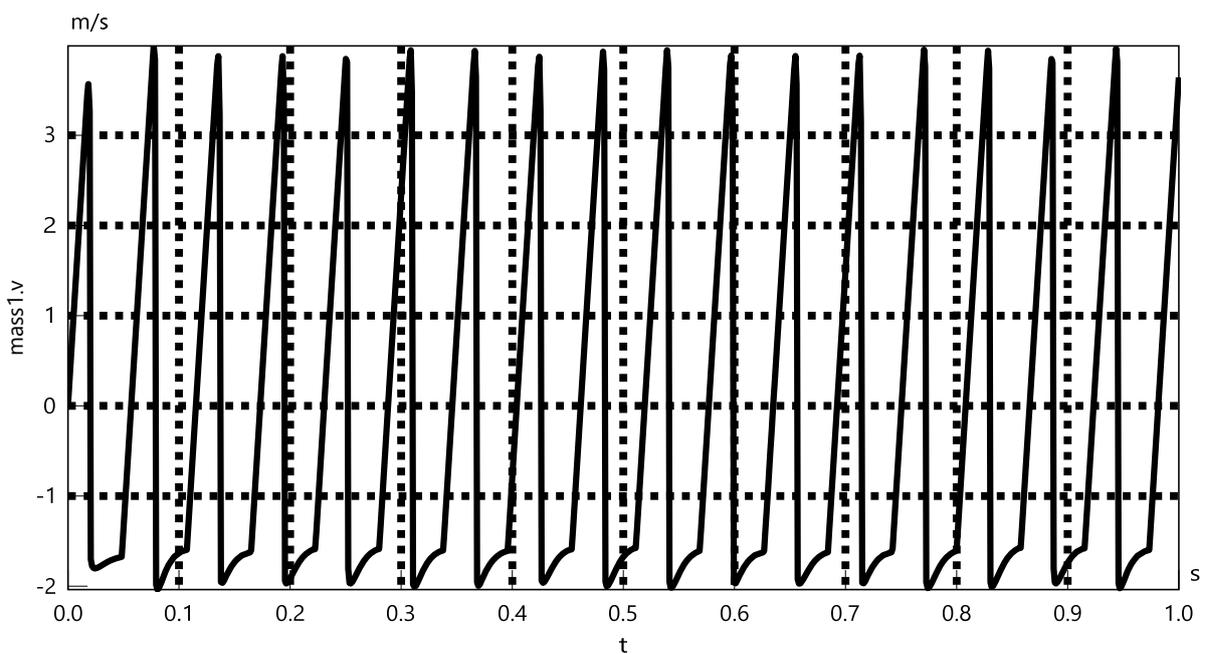


Рис. 5. График скорости бойка ударной машины.

Рассчитаем по полученным результатам геометрические характеристики бойка ударной машины (рис. 6).

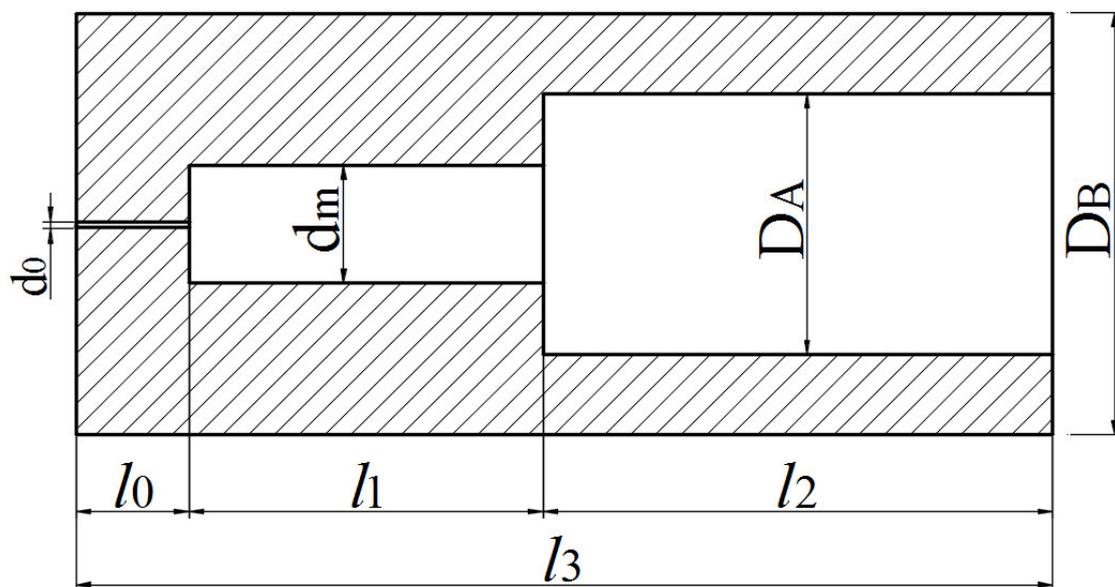


Рис. 6 Геометрические характеристики бойка ударной машины

Подставляя формулы для объема цилиндрического тела в формулу для нахождения массы через плотность и объем, получим:

$$\frac{\pi}{4} (D_B^2 (l_0 + l_1 + l_2) - d_0^2 l_0 - d_m^2 l_1 - D_A^2 l_2) \rho = m$$

Преобразуем:

$$\frac{\pi}{4} ((D_B^2 - d_0^2) l_0 + (D_B^2 - d_m^2) l_1 + (D_B^2 - D_A^2) l_2) \rho = m$$

Примем  $l_1 = l_2$ , тогда

$$((D_B^2 - d_0^2) l_0 + (2D_B^2 - d_m^2 - D_A^2) l_1) = \frac{4m}{\pi\rho}$$

Выразим отсюда  $l_1$ :

$$l_1 = \frac{\left( \frac{4m}{\pi\rho} - (D_B^2 - d_0^2) l_0 \right)}{2D_B^2 - d_m^2 - D_A^2}$$

Примем  $l_0 = 0.015$  м, плотность стали  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>, массу бойка  $m = 6.1$  кг.

Проведя расчеты, получим  $l_1 = l_2 = 0.1$  м,  $l_3 = 0.215$  м.

### Заключение

С помощью метода численной оптимизации для заданной массы и наружного диаметра бойка получены значения конструктивных параметров, обеспечивающие максимальную предупредную скорость пневматической ударной машины выбранной конструктивной схемы с учетом наложенных ограничений. Ис-

ходя из полученных оптимальных значений параметров определены геометрические размеры бойка ударной машины.

Таким образом, использование метода численной оптимизации при проектировании ударных машин позволяет быстро получать точные оптимальные параметры машины по заданным проектировщиком отдельным характеристикам и/или допустимым пределам изменений каких-либо характеристик, которые выбираются из целевых, конструктивных или иных соображений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смоляницкий Б.Н., Червов В.В. Повышение эффективности использования энергоносителя в пневмомолотах для подземного строительства // ФТПРПИ. - № 5. – 2014. – С. 143-157.
2. Данилов Б. Б., Речкин А. А. Оценка применимости в пневмо-ударных машинах и оптимизация формы стационарно установленного упругого клапана. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2021. — Новосибирск: СГУГиТ, 2021: Т. 2. №3— С. 189 – 194.
3. Речкин А.А., Данилов Б.Б. Влияние формы опорной поверхности стационарно установленного упругого клапана на изменение предударной скорости бойка ударной машины // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. — Новосибирск: СГУГиТ, 2022: Т. 2. № 3. С. 279-285.
4. Данилов Б.Б., Речкин А.А. Зависимость изменения энергии бойка от формы сечения стационарно установленного упругого клапана при их взаимодействии в ударной машине // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук - Т. 9. № 2. – 2022. - С. 128-133.
5. Саймон Дэн. Алгоритмы эволюционной оптимизации / пер. с англ. А. В. Логунова. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 1002 с.: ил.

© А. А. Речкин, 2024

*Д. Е. Рублев<sup>1\*</sup>*

## **Влияние водно-эрозионных процессов на устойчивость борта угольного разреза**

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
*\*denmiir@211.ru*

**Аннотация.** Рассмотрено влияние вод талого и дождевого стока на образование трещин и водных линз в бортах угольного разреза. Выявлена зависимость скорости смещений четвертичных отложений от объёма выпавших осадков. Предложены меры по снижению негативного влияния вод дождевого стока и дренажа на устойчивость борта, формирование зигзагообразных трещин и контроля их развития в массиве верхнего горизонта краевой зоны карьерного пространства угольного разреза. При отсутствии бокового отпора такие нарушения приводят к эрозионным отслоениям, потере устойчивости и обрушению вышележащих грунтов на нижерасположенные уступы как при увлажнении, так и при температурных перепадах среды.

**Ключевые слова:** борт угольного разреза, водно-эрозионные процессы в грунтах, геомониторинг

*D. E. Rublev*

## **The influence of water erosion processes on the stability of the sides of a coal cut**

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Institution of Science N.A. Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
*\*denmiir@211.ru*

**Abstract.** The influence of melt and rain water on the formation of cracks and water lenses in the sides of a coal cut is considered. The dependence of the rate of displacement of Quaternary sediments on the volume of precipitation was revealed. Measures have been proposed to reduce the negative impact of rainwater and drainage on the stability of the side, the formation of zigzag cracks and control their development in the upper horizon of the edge zone of the open-pit coal mine. In the absence of lateral resistance, such violations lead to erosional detachments, loss of stability and collapse of overlying soils onto underlying ledges both when moistened and when there are temperature changes in the environment.

**Keywords:** coal cut wall, water erosion, geomonitoring

### ***Введение***

С увеличением глубин и площадей добычи угля открытым способом в Кузбассе усиливается воздействие водной эрозии как на осваиваемые горизонты угольных разрезов, так и на подготавливаемые к разработке слои верхних горизонтов четвертичных отложений, представленных, в основном, чередующимися прослоями глин и суглинков, залегающих разноуровнево на алевролитах и аргиллитах с пластами угля и перепадами высот от нескольких до десятков метров,

местами в пределах сотни. Из-за сложности строения и чередования почвенных слоёв верхних горизонтов происходит изменение режимов накопления и дренажа подземных вод при выпадении дождевых осадков и их неравномерного стока в грунтах с различной проницаемостью [1, 2]. С увеличением накопления объёмов вод в грунтах в летний период наблюдается их насыщение, в местах залегания слабопроницаемых глинистых прослоев образуются плавунные участки (рис. 1). В зимний период вблизи поверхности происходит образование ледяных прослоек и линз, ускоряется развитие трещин с потерей контактов между структурными элементами, формируемыми такими прослойками.

Важную роль при накоплении влаги в линзах играют трещины, образующиеся в верхних слоях осадочных грунтов в периоды просыхания. Через такие трещины в периоды дождей вода попадает в нижние слои, где накапливается в поровом пространстве слабопроницаемых суглинков и глин, что приводит к набуханию последних. Под воздействием капиллярно-дренажных эффектов изменяется объёмный вес налегающей толщи и упруго-пластичные свойства грунтовых отложений, приводящие к переформированию краевой части борта.

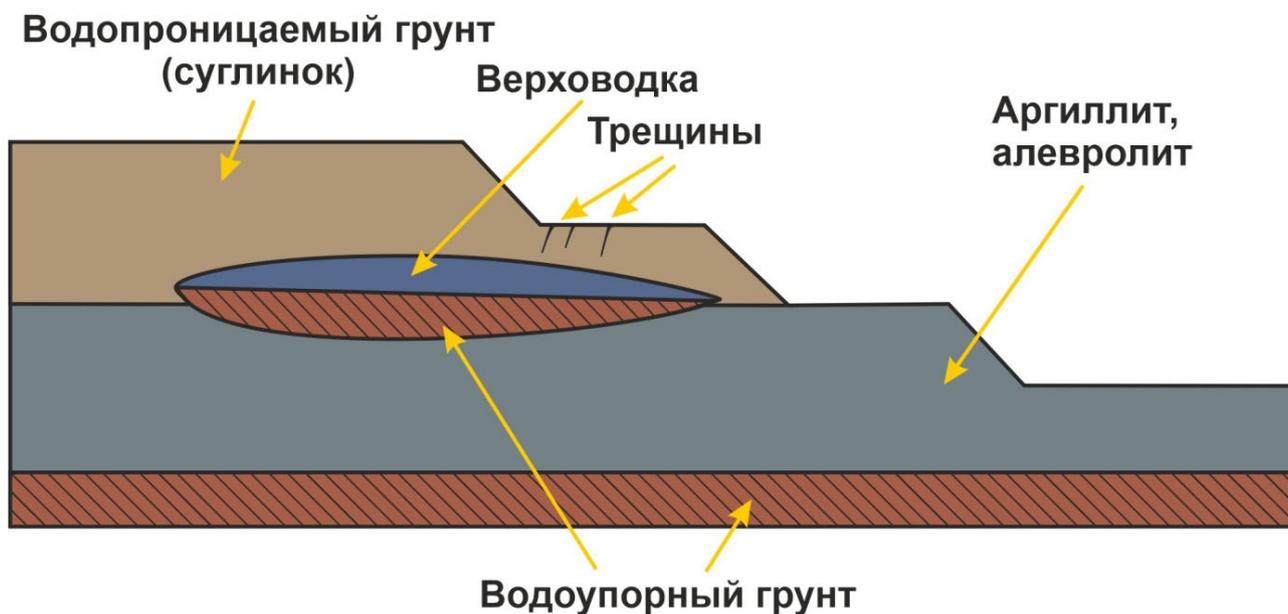


Рис. 1. Образование плавунного участка вблизи краевой кромки борта угольного разреза

Указанные факторы приводят к образованию зеркал скольжения и сползанию по ним кромки борта, которое особенно существенно проявляется в периоды потеплений. Данный факт связан с изменениями упруго-прочностных параметров и сил сцепления грунтов в результате дренажа дождевых и талых вод [3] и значительном их накоплении в ложбинах и трещинах при снеготаянии.

## Методы и материалы

В качестве объекта исследования был выбран участок краевой зоны борта угольного разреза, подверженный влиянию водно-эрозионных процессов с постепенным формированием разломного отслоения грабенного типа вдоль кромки борта. Верхний горизонт данного участка сложен чередующимися прослоями глин и суглинков мощностью от нескольких до десятков метров, склонен к постепенному проседанию с переформированием и эрозионным отслоением верхней кромки борта уступа, что сопровождается (рис. 2) смещением грунтовых масс в сторону свободной поверхности по кромке борта.



Рис. 2. Развитие эрозии верхнего горизонта кромки борта угольного разреза

На исследуемом участке протяженностью более 1 км для контроля смещений грунтовых отложений верхнего горизонта краевой зоны борта было оборудовано 5 реперных точек наблюдательной станции, установленных перпендикулярно кромке борта на расстоянии 10 м друг от друга, как показано на (рис. 3). Контроль смещений производился при помощи GPS измерений [4].

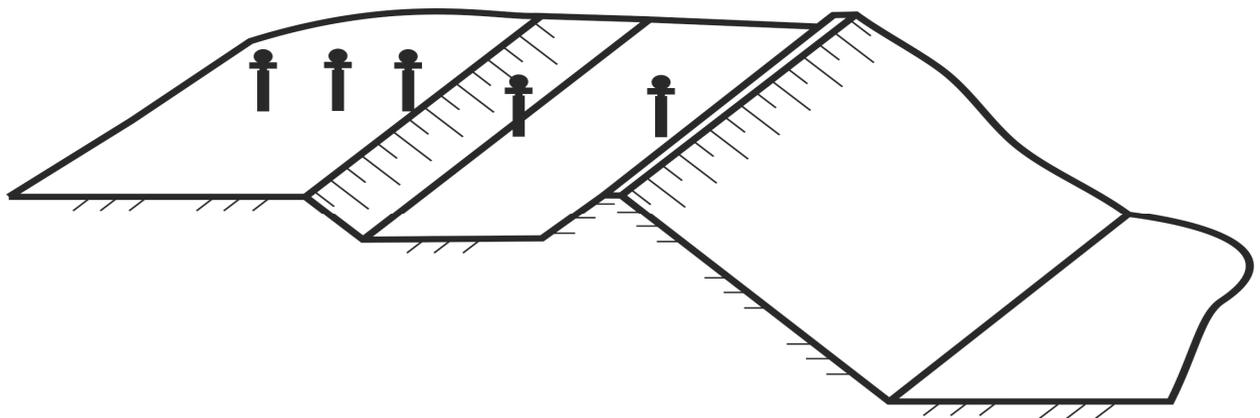


Рис. 3. Расположение реперов для наблюдения смещений поверхности грунта в зоне разлома, значком † обозначены репера

## Результаты

По данным измерений установлено, что наибольшие смещения грунта наблюдений в весенний период при снеготаянии, а также в случае выпадения аномального количества дождевых осадков. В табл. 1 и на (рис. 4) показаны среднесуточные смещения реперов за трехгодичный период наблюдений.

Таблица 1

Зависимость суточных смещений реперов от количества осадков

Наименование параметра	Год			
	2021	2022	2023	
Количество осадков за сезон, мм	326	234	351	
Скорость смещений реперов по створу, мм/сут.	минимальная	3.25	2.61	3.51
	максимальная	3.94	3.7	3.9
	средняя	3.6	3.24	3.78

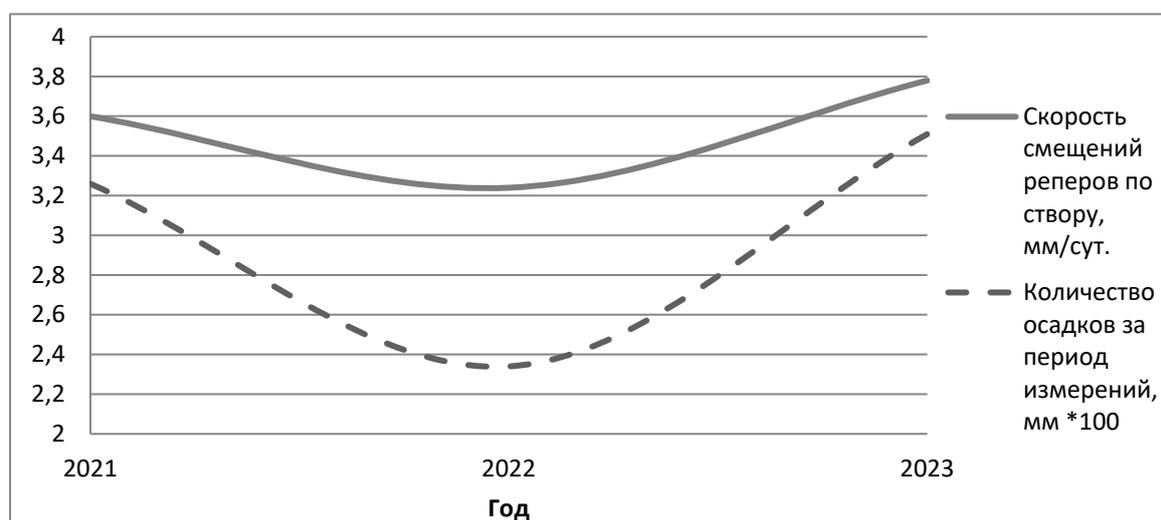


Рис. 4. Изменение суточных смещений реперов в зависимости от количества выпадения осадков по годам

Смещения грунтовых отложений в процессе увлажнения происходят послойно, при этом просматривается зависимость скорости смещения от объёмов таяния снежного покрова и выпадения дождевых осадков. Ниже приведён расчёт гидрологических параметров исследуемого участка за периоды дождевых проявлений с целью оценки продолжительности времени, необходимого для контроля смещений реперов в результате аномальных осадочных проявлений.

За период с 01.04 по 01.11.2023 года в разрезе выпало 351 мм осадков. Объём дождевых вод за указанный период измерений составил согласно [5]:

$$W_{\text{атм.осад.}} = E_{\text{атм}} F = (0.351 \cdot 50 \cdot 100) = 1755 \text{ м}^3 \quad (1)$$

где:  $E_{\text{атм.}}$  – количество осадков, мм;  $F$  – площадь поверхности водосброса,  $\text{м}^2$ .

Максимальное суточное количество осадков, выпавших в районе разреза в 2023 году составило  $\sim 22$  мм, при этом суточный объём водосбора составил

$$W_{\text{атм.осад. макс.}} = (0.022 \cdot 50 \cdot 100) = 110 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Коэффициент фильтрации  $K_f$  воды в супесях составляет  $\sim 50$  мм/сут.

Таким образом, исходя из расчётов, максимальный выпавший объём осадков был полностью отфильтрован в слой супеси в течение 10-11 часов, без учёта накопления и дренажа осадков с окружающего рельефа местности по впадинам и ложбинам. Исходя из полученных результатов при данных условиях, определение наибольших смещений супеси будет проявляться в максимальный момент их набухания, т.е. через 1-2 часа после окончания выпадения осадков.

В табл. 2 показаны значения максимально допустимой высоты борта четвертичных отложений, полученных по результатам лабораторных испытаний образцов, взятых из естественных условий геосреды. Коэффициент запаса прочности  $K$  выбран для нерабочего борта и составляет 1.2. Значения высоты борта рассчитаны по формуле (2) [6, 7]:

$$H_{90} = \frac{2C}{\gamma \cdot \text{tg}(45 - 0,5\varphi)} / K \quad (2)$$

где:  $C$  – сцепление в массиве, кПа;  $\varphi$  – угол внутреннего трения, град.;  $\gamma$  – объёмный вес горной массы,  $\text{МН}/\text{м}^3$ ;  $K$  – коэффициент запаса прочности для нерабочего борта, был выбран равным 1.2.

Таблица 2

Изменение свойств суглинистых отложений в зависимости от естественной влажности и угла внутреннего трения

Влажность естественная, %	Объёмный вес $\gamma$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Сцепление в образце $C$ , кПа	Максимально допустимая высота борта, м
23.29	2010	68.00	56.88	24.76
24.95	2030	62.89	51.98	18.05
26.60	2050	57.78	48.05	13.79
28.26	2070	52.67	44.13	10.72
29.92	2090	47.56	40.21	8.41
31.57	2120	42.44	36.29	6.62
33.23	2140	37.33	32.36	5.20
34.89	2160	32.22	27.46	3.92
38.20	2200	22.00	19.61	2.25

Как видно из табл. 2, при влагонасыщении суглинков параметры допустимой высоты борта могут различаться в 11 раз. В периоды переувлажнения суглинков происходит изменение угла внутреннего трения  $\phi$  и увеличение их объёмного веса на 4-7%, что приводит к несоответствию расчётных значений требованиям устойчивости борта. Дополнительно наблюдается вымывание глинистых частиц из супесей, оседание которых приводит к формированию и накоплению водоупорного слоя, вследствие уменьшения скорости фильтрации воды, а также к образованию или наполнению влагой уже имеющихся водных линз.

### *Обсуждение*

В условиях угольных разрезов необходимо отслеживать деформирование краевых зон бортов в результате воздействий природно-климатических факторов, основными из которых являются ветро-дождевые проявления. Одновременно просматривается возможность объяснить эффект «волочения» поверхностных слоев грунта по коренным отложениям осваиваемого массива при расширении-сжатии под воздействием суточно-сезонных изменений температуры окружающей среды при отсутствии бокового подпора в краевой части борта.

Если выбрать образец глины линейным размером 10 м, расположенный в естественных условиях залегания с направлением в сторону кромки борта, то при суточном увеличении положительной температуры окружающей среды в среднем на  $\sim 10^{\circ}\text{C}$  (нагрев в дневное время, характерный для Кузбасса) такой образец в результате линейного расширения может увеличиться на  $\sim 0.81$  мм. В дисперсных средах такой эффект может проявляться в виде послойных продольных смещений грунта, сопровождающихся проскальзыванием относительно друг друга пластинчатых структур, характерных для глин и суглинков. С понижением суточной температуры среды в ночное время на  $\sim 10^{\circ}\text{C}$  образец должен уменьшиться в размере на ту же величину, т. е. должно произойти его сжатие с возвращением практически в исходное положение.

Однако, в связи с дисперсностью среды, состоящей из глин и суглинков, при отсутствии бокового подпора в краевой части борта обратное сжатие может и не происходить в связи с проскальзыванием микрочастиц грунта относительно друг друга, что способствует образованию микротрещин. В результате повторяющихся суточных циклов нагревания-охлаждения поверхности грунта за  $\sim 100$  суток увеличение линейного размера образца может составить  $\sim 8$  мм, что способствует развитию протяженных микротрещин, постепенно увеличивающихся в размерах и приводящих к смещениям грунта, направленным, в основном, к свободной от бокового подпора кромке борта. В итоге на поперечных изломах образца могут формироваться как протяженные трещины вдоль кромки борта, так и происходить смещения верхних слоев грунта относительно нижележащих. Визуально это заметно по отклонениям установленных на трассе наблюдательных реперов в направлении краевой части борта, что указывает на послойное смещение грунтов, создающее эффект «волочения».

## *Заключение*

Наиболее опасными условиями для ведения открытых горных работ являются периоды снеготаяния и сверхнормативного выпадения дождевых осадков в зонах с возможным линзообразованием, а также, как отмечено в обсуждении, влияние суточно-сезонных перепадов температуры окружающей среды.

В таких условиях необходимо контролировать как сам забой, так и близлежащие зоны, избегать накопления снежного покрова в зонах, склонных к водозрозионным разрушениям, т.к. часть воды при снеготаянии стекает по откосам, размягчая верхнюю кромку уступа, что приводит к вымыванию грунта по структурам трещин. Длительное воздействие влаги приводит, как правило, к пучению и выпиранию грунтов, что с неизбежностью создает условия для формирования при циклическом намокании/просыхании накопительного деформационного эффекта, который проявляется в виде образования зеркал скольжения и трещин, приводящих к возможному обрушению части борта.

По итогам исследований угольного разреза рекомендовано:

- 1) Организовать дополнительные водосбросы и откачку вод поверхностного стока за пределы зоны добычи при помощи водоотводящих скважин.
- 2) Повысить водопроницаемость почвы, с учётом рельефа местности и организовать отвод талого стока путём изменения крутизны склонов.
- 3) Для своевременного принятия мер по предотвращению разрушений при бортовой кромки в зонах, склонных к повышенному гидровоздействию методами неразрушающего контроля должен быть организован постоянный геомониторинг и контроль уровня грунтовых вод.

## *Благодарности*

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юшкин В. Ф. О прогнозе оседаний грунтов в бортах карьера : Сб. материалов XV Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019». – Новосибирск: СГУГиГ, 2019. – Т. 2, № 5. – С. 132-137. – 2019.
2. Шевченко Д.А. Сивоконь Ю.В., Влияние стока талых вод на водную эрозию почвы : Международный научно-исследовательский журнал №7. С. 133-135. – 2015.
3. Рублев Д.Е. Об изменении прочностных свойств четвертичных отложений в бортах карьера под влиянием природно-климатических факторов : Сборник материалов XVIII Международного научного конгресса Интерэкспо Гео-Сибирь. Т. 2. – Новосибирск. Изд-во: СГУГИТ. С. 295-299. – 2022.
4. А.Г. Малков Высшая геодезия. Высокоточные измерения : Новосибирск. Изд-во: СГГА, 2011. – 46 с.
5. Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология : учебник для вузов. М.; Берлин : Директ-Медиа, 2017, 752 с.
6. Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов : – М. : ИПКОН РАН, 2022. – 80 с.
7. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений.

© Д. Е. Рублев, 2024

*Е. П. Русин<sup>1\*</sup>, Г. Н. Хан<sup>1</sup>*

## **К разработке средств моделирования внедрения активного ковша ПДМ в штабель горной массы**

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: gmmlab@misd.ru

**Аннотация.** Разработаны средства физического и численного моделирования внедрения ковша погрузочно-доставочной машины в штабель горной массы при концентрированном приложении статической и динамической нагрузок. Разработан и изготовлен лабораторный стенд, представляющий собой имитатор ковша, снабженный автоматическими одноударными устройствами. Последние, встречая сопротивление среды при внедрении ковша в штабель модельного материала, автоматически срабатывают. Предварительные испытания стенда показали его работоспособность. Проведена модификация разработанной в ИГД СО РАН компьютерной программы PM2D, заключающаяся в представлении рабочего инструмента как совокупности дискретных элементов, на которых можно задавать граничные условия.

**Ключевые слова:** погрузочно-доставочная машина, активный ковш, штабель горной массы, лабораторный стенд, метод дискретных элементов, граничный дискретный элемент

*E. P. Rusin<sup>1\*</sup>, G. N. Khan<sup>1</sup>*

## **On the development of means for simulating the penetration of an active LHD bucket into a rock pile**

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: gmmlab@misd.ru

**Abstract.** To study the penetration of a load-haul-dumper bucket into a rock pile under concentrated application of static and dynamic loads, tools for simulating this process have been developed. A laboratory test-bench has been developed and manufactured, which is a bucket simulator equipped with automatic single-impact devices. The latter, when encountering resistance from the medium in the process of inserting the bucket into a pile of model material are automatically triggered. Preliminary tests of the test-bench showed its workability. A modification of the PM2D computer program developed at the Institute of Mining SB RAS was carried out, which consists in representing the working tool as a set of discrete elements on which boundary conditions can be set.

**Keywords:** load-haul-dumper, active bucket, rock pile, laboratory test-bench, discrete element method, boundary discrete element

### ***Введение***

Необходимость повышения безопасности и производительности горных работ в усложняющихся горнотехнических условиях обуславливает современную тенденцию перехода к цифровым интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам. В равной мере это относится к ковшовым

погрузочно-доставочным машинам (ПДМ), которые играют ключевую роль в сфере погрузки и транспортирования горной массы под землей [1, 2]. Одним из наиболее важных аспектов в этой области является определение оптимального – с точки зрения максимизации эффективности загрузки и минимизации энергопотребления – режима черпания раздробленной породы из навала [3].

Процесс черпания горной массы сложно автоматизировать из-за динамических и непредсказуемых взаимодействий между ковшом и породой [4]. Решения, которые подходят для однородных материалов, таких как гравий, не обязательно работают для горной массы по причине значительного распределения фрагментов пород по размерам [5]. К настоящему моменту в сообществе ученых-горняков сформировалась точка зрения о том, что для успешной автоматизации ковшовой погрузки необходимо улучшить понимание поведения фрагментированных горных пород [6].

### *Постановка задачи и выбор методов исследования*

Известно [7], что фрагментированные твердые среды обладают дилатансионной (структурной) прочностью, которая тем выше, чем больше размер отдельных частей. Поэтому один и тот же рабочий орган при внедрении в крупнокусковую среду, по сравнению с мелкодисперсным материалом, испытывает значительно большее сопротивление. Для его снижения усилие внедрения прикладывают концентрированно, создавая в локальных областях большие, чем в случае распределенной нагрузки, напряжения, превышающие структурную прочность навала. При этом структура массива сыпучего материала локально разрушается, в ней образуются дефекты, снижающие прочность среды в окрестности концентрированного приложения нагрузки. За счет этого сопротивление внедрению рабочего органа падает.

Для реализации данного эффекта днище ковша некоторых погрузочных выполняется в виде плоского клина [8, 9], что позволяет снизить необходимое для внедрения в навал горной массы напорное усилие. Однако и при использовании такого конструктивного решения сопротивление внедрению ковша в штабель остается значительным. Для его преодоления идут на увеличение сцепного веса ПДМ, мощности их привода, прочности конструкции, что сопряжено с высокими капитальными и эксплуатационными затратами [8, 10].

Логичным в такой ситуации кажется дополнительное приложение к ковшу ударной нагрузки. Высокоамплитудные силовые импульсы, возникающие при этом на контакте режущей кромки и фрагментов породы, заставляют штабель деформироваться более интенсивно. Проведенными в ИГД СО РАН экспериментами показано, что при дополнительном воздействии ударным устройством на макет ковша породопогрузочной машины статическое усилие внедрения снижается в 6-10 раз [11]. Целесообразным является совмещение двух изложенных выше принципов: приложение ударной нагрузки к штабелю и при этом концентрирование ее в локальных областях. Такой подход реализован в конструкции оснащенного ударными зубьями (активного) экскаваторного ковша [12] для разработки монолитных горных пород, прочность которых превышает предел до-

ступный для статического ковша. Запатентована, но пока не реализована на практике конструктивная компоновка ПДМ с активным ковшом [13].

Для эффективной натурной реализации активного ковша ПДМ необходимо изучить механику внедрения рабочего органа ПДМ в штабель горной массы при концентрированном приложении статической и динамической нагрузок. На настоящем этапе задача сводится к рассмотрению процессов, происходящих на контакте и в ближайшей окрестности контакта ударного рабочего органа с фрагментированной массой. Задача решается методами физического лабораторного и численного эксперимента. Последующее изложение посвящено разработке соответствующих средств моделирования.

### ***Конструкция стенда для моделирования процесса внедрения рабочего органа ПДМ в штабель горной массы***

Как упомянуто выше, задача настоящего исследования сводится к рассмотрению процессов, происходящих на контакте ударного рабочего органа с фрагментированной горной породой и в ближайшей окрестности контакта в период внедрения ковша в штабель. Поэтому элементы стенда, предназначенные для имитации процесса черпания, в нашем случае являются избыточными. Помимо этого, воздействие на штабель должно производиться при совмещении статического напора и ударной нагрузки. Наиболее близко указанным требованиям отвечает конструктивная компоновка стенда с активным ковшом [11], которую и примем за основу.

Конструктивные элементы разрабатываемого стенда (рис. 1) размещены на основании 1, на котором жестко закреплены бункер 2 (600x400x400 мм) с модельным сыпучим материалом (щебнем) 3 и гидроцилиндр 4, шток которого жестко соединен с датчиком силы 5, который в свою очередь жестко соединен со штангой-толкателем 6. Макет активного ковша (далее – ковш) 7, конструкция которого описана ниже, жестко соединен со штангой 6 посредством узла крепления 8, позволяющего изменять угол наклона ковша 7 к горизонтали. Для изменения высоты установки гидроцилиндра 4 при изменении угла наклона ковша 7 используют сменные прокладки, размещаемые под гидроцилиндром 7. Жесткость крепления гидроцилиндра 4 к основанию 1 обеспечивается регулируемым по высоте винтовым прижимом 9. В состав стенда входит компрессор 10, подающий сжатый воздух к ударным устройствам ковша 7 через магистраль 11, коллектор 12 и питающие шланги 13. Гидроцилиндр 4 приводится в действие маслостанцией 14 с электроприводом. Датчик 5 снабжен дисплеем 15, отображающим текущее значение напорного усилия, а также разъемом (на рисунке не показан) для соединения с записывающей аппаратурой.

Макет активного ковша (рис. 2) имитирует днище рабочего органа ПДМ и представляет собой плоскую платформу 1, имеющую возможность изменения угла наклона. На настоящем этапе исследований решено не снабжать ковш боковыми и задней стенками, при необходимости это может быть сделано впоследствии. На платформе 1 жестко закреплены пневматические одноударные устройства (пневмоударники) 2. В качестве последних использованы пневматические



Пика подпружинена и, хотя имеет некоторую осевую подвижность, постоянно находится в переднем положении. При движении ковша вперед и встрече пика с препятствием, которое оказывает сопротивление ее движению, пика несколько смещается назад и этим запускает ударный механизм. Пневмоударник срабатывает, по пике наносится удар, который передается препятствию. Под действием удара препятствие смещается вперед или в сторону и пика возвращается в переднее положение. При этом ударный механизм взводится, то есть снова переходит в состояние готовности к удару. При следующей встрече с препятствием цикл повторяется.

Проведены предварительные испытания стенда при горизонтальном и наклонном положениях ковша, а также при различных скоростях его перемещения. Во всех случаях, внедряясь в модельную среду, пневмоударники автоматически срабатывали с различными периодами между ударами. Датчик при этом показал скачкообразные изменения напорного усилия. С видеозаписями внедрения ковша в модельную среду можно ознакомиться по ссылке <https://cloud.mail.ru/public/FcQK/UNeATjxE7>.

### ***Модификация компьютерной программы PM2D для исследования процесса внедрения рабочего органа ПДМ в штабель горной массы***

Для численного решения указанной выше задачи используется разрабатываемая в ИГД СО РАН модифицированная компьютерная программа PM2D, основанная на методе дискретных элементов (МДЭ) [14]. Модификация PM2D требуется из-за сложности моделирования задач, связанных со взаимодействием механизма, рабочий инструмент которого внедряется в сыпучий материал. К настоящему времени численное моделирование взаимодействия рабочего инструмента с сыпучим материалом с использованием МДЭ ограничено возможностью задавать краевые условия на поверхности органа только в виде его перемещения с заданными линейными и угловыми скоростями [15, 16]. Для устранения указанного недостатка предлагается рабочий инструмент и ограждающие сыпучий материал поверхности представить состоящими из граничных дискретных элементов (ГДЭ), отличающихся от дискретных элементов (ДЭ) сыпучего материала тем, что на ГДЭ можно будет задавать граничные условия.

Рабочий орган может состоять из корпуса  $i$  (элемент-предок) и нескольких частей  $j_i, k_i$  (элементы-потомки), движения которых надо рассматривать относительно центра масс  $i$ -го предка (рис. 3). Число элементов-потомков не ограничивается показанными для примера на рис. 3 двумя элементами. В свою очередь,  $j_i$ -й и  $k_i$ -й элементы могут иметь своих собственных потомков  $l_{j_i}, m_{j_i}$  и т.д., для которых предками являются  $j_i$ -й и  $k_i$ -й элементы соответственно. Тогда движения  $l_{j_i}$ -го и  $m_{j_i}$ -го элементов надо рассматривать уже относительно центра масс  $j_i$ -го и  $k_i$ -го элементов. На рис. 3 символами  $\Gamma_i, \Gamma_{j_i}, \Gamma_{k_i}, \Gamma_{l_{j_i}}, \Gamma_{m_{k_i}}$  обозначены граничные условия, которые могут быть заданы на соответствующих граничных дискретных элементах в четырех различных сочетаниях:

$$\mathbf{v}_\Gamma, \boldsymbol{\omega}_\Gamma; \mathbf{F}_\Gamma, \mathbf{M}_\Gamma; \mathbf{v}_\Gamma, \mathbf{M}_\Gamma; \mathbf{F}_\Gamma, \boldsymbol{\omega}_\Gamma; \quad (1)$$

где  $\mathbf{v}_\Gamma$ ,  $\boldsymbol{\omega}_\Gamma$ ,  $\mathbf{F}_\Gamma$ ,  $\mathbf{M}_\Gamma$  – векторы линейной скорости, угловой скорости, силы и момента ГДЭ соответственно. Таким образом, схема на рис. 3 является иерархически построенной системой из ГДЭ, связанных между собой структурой типа «потомок → предок». При соприкосновении ГДЭ с ДЭ между ними возникают такие же силы взаимодействия, как и между контактирующими ДЭ сыпучего материала.

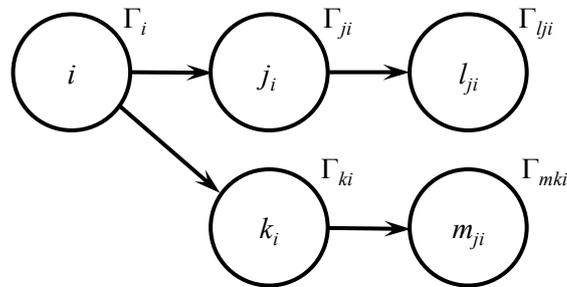


Рис. 3. Схема взаимодействия деталей рабочего органа (обозначения в тексте)

Рассмотрим взаимодействие рабочего органа погрузочно-доставочной машины, состоящего из корпуса и рабочего инструмента, с сыпучим материалом на примере, представленном на рис. 4.

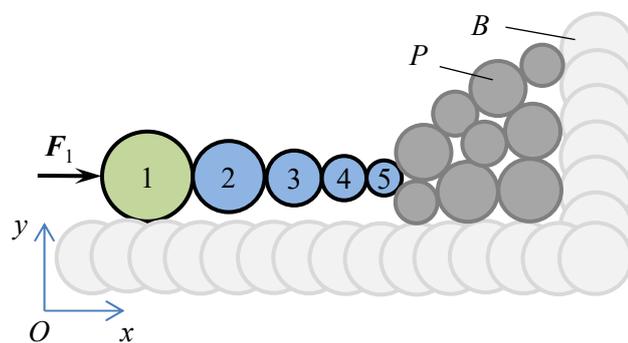


Рис. 4. Внедрение рабочего инструмента в сыпучий материал: 1 – ГДЭ корпуса;  $\mathbf{F}_1$  – сила, приложенная к элементу 1; 2-5 – ГДЭ рабочего инструмента;  $B$  – ГДЭ ограждения;  $P$  – ДЭ сыпучего материала

На ГДЭ 1 задаются следующие граничные условия  $\Gamma_1$ :

$$F_{x1} = F_{x1}^0, F_{y1} = 0, \boldsymbol{\omega}_1 = 0, \quad (2)$$

где  $F_{x1}$ ,  $F_{y1}$  – компоненты вектора силы  $\mathbf{F}_1$ , прилагаемой к ГДЭ 1;  $F_{x1}^0 > 0$ .

Рабочий инструмент моделируется совокупностью ГДЭ 2-5. На элемент 2 в зависимости от величины перекрытия  $\delta_{21}$  элементов 1 и 2, задаются различные граничные условия. В начальный момент времени  $t = 0$  считается, что  $\delta_{21} = 0$ .

Далее в результате действия компоненты силы  $F_{x1}$  на элемент 1, он смещается в сторону элемента 2 и начинает давить на него. В результате рабочий инструмент упирается своим последним элементом 5 в сыпучий материал  $P$ , как следствие, начинает расти величина перекрытия  $\delta_{21}$ . В результате между элементами 1 и 2 возникает сила отталкивания  $F_{x12}^e$ . На данной стадии движения рабочего органа принимаются следующие граничные условия  $\Gamma_2$ :

$$F_{x2} = 0, F_{y2} = 0, \omega_2 = 0; \delta_{21} < \delta_{21}^0, \quad (3)$$

где  $F_{x2}, F_{y2}$  – компоненты вектора силы  $F_2$ , прилагаемой к ГДЭ 2;  $\delta_{21}^0 > 0$  – заданная величина. При достижении  $\delta_{21} = \delta_{21}^0$  на элементе 2 принимаются другие граничные условия:

$$F_{x2} = F_{x2}^0, F_{y2} = 0, \omega_2 = 0; \delta_{21} \geq \delta_{21}^0. \quad (4)$$

где  $F_{x2}^0 > 0$  – заданная компонента граничной силы, направленная в ту же сторону, что и компонента силы  $F_{x12}^e$ , действующая на элемент 2 со стороны элемента 1. В результате действия суммарной силы  $F_{x2}^0$  и  $F_{x12}^e$  на элемент 2 рабочий инструмент внедряется в сыпучий материал.

На ГДЭ 3-5 задаются граничные условия  $\Gamma_3$ – $\Gamma_5$  в виде

$$F_{3-5} = 0, M_{3-5} = 0, \quad (5)$$

где  $F_{3-5}, M_{3-5}$  – векторы силы и момента на соответствующих ГДЭ.

Ограждающие сыпучий материал поверхности  $B$  состоят из ГДЭ, на которых заданы граничные условия  $\Gamma_B$ :

$$v_B = 0, \omega_B = 0, \quad (6)$$

где  $v_B, \omega_B$  – векторы линейной и угловой скоростей ГДЭ.

### *Заключение*

Разработан и изготовлен стенд для моделирования процесса внедрения рабочего органа погрузочно-доставочной машины в штабель горной массы при концентрированном приложении статической и динамической нагрузок. Стенд представляет собой снабженный одноударными устройствами имитатор ковша ПДМ, который под действием прикладываемого гидроцилиндром статического напорного усилия внедряется в штабель модельного фрагментированного материала при автоматическом срабатывании ударных устройств, встречающих сопротивление среды. Предварительные испытания стенда показали его работоспособность.

Проведена модификация компьютерной программы PM2D для исследования процесса внедрения рабочего органа погрузочно-доставочной машины в штабель горной массы при концентрированном приложении статической и ди-

намической нагрузок. Модификация заключается в представлении рабочего инструмента как совокупности дискретных элементов, на которых можно задавать граничные условия.

*Работа выполнена в рамках проекта НИР № 121052600390-5.*

Авторы благодарят Н.Д. Сырмина и С.И. Кондратенко за помощь в подготовке эксперимента.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xiao, W., Liu, M., Chen, X. Research status and development trend of underground intelligent load-haul-dump vehicle – a comprehensive review // *Applied Science*. – 2022. – No. 12. – 9290. – <https://doi.org/10.3390/app12189290>.
2. Tampier, C., Mascaró, M., Ruiz-del-Solar, J. Autonomous loading system for load-haul-dump (LHD) machines used in underground mining // *Applied Science*. – 2021. – V. 11. – No. 18. – 8718. – <https://doi.org/10.3390/app111887181>.
3. Dadhich, S., Bodin, U., Andersson, U. Key challenges in automation of earth-moving machines // *Automation in Construction*. – 2016. – V. 68. – Pp. 212-222. – <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009>.
4. Lindmark, D. M., Servin, M. Computational exploration of robotic rock loading // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2018. – V. 106. – Pp. 117–129. – <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.04.010>.
5. Marshall, J.A. Mining Robotics. – In: Ang, M., Khatib, O., Siciliano, B. (eds) *Encyclopedia of Robotics*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – [https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1\\_35-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_35-1).
6. Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). – Lulea, Sweden: Rock Tech Centre. – 2016. – 124 p. – [http://photonicsweden.org/wp-content/uploads/STRIM-agenda\\_2016.pdf](http://photonicsweden.org/wp-content/uploads/STRIM-agenda_2016.pdf) (08.12.2023).
7. Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б. Об учете дилатансии в основных справочных формулах механики сыпучих сред // *ФТПРПИ*. – 1986. – № 4. – С. 21-40. – <https://doi.org/10.1007/BF02500846>.
8. Скорняков Ю.Г. Системы разработки и комплексы самоходных машин при подземной добыче руд. – М.: Недра, 1978. – 232 с.
9. Trident SA. Atlas Copco CAVO 320 Air Loader. – <https://tridentsa.co.za/airloaders/cavo-320-air-loader/> (08.12.2023).
10. Стажевский С.Б., Фрейдин А.М., Русин Е.П. На подземных рудниках Швеции // *Горный журнал*. – 1991. – №10. – с.55 – 59.
11. Лабутин В.Н., Маттис А.Р. Способ снижения сопротивления внедрению ковша погрузочно-транспортной машины в штабель горной породы // *ФТПРПИ*. – 2011. – №3. – С. 74-81.
12. Шишаев С. В., Федулов А. И., Маттис А. Р. Расчет и создание ковша активного действия. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. – 113 с.
13. Лабутин В.Н., Маттис А.Р., Стажевский С.Б. Погрузочно-транспортная машина. Патент РФ №2298103. – БИ. – 2007. – № 12.
14. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Geotechnique*. – 1979. – V.29, no. 1. – Pp. 47 – 65.
15. Takahashi, H. Simulation of the resistive forces acting on the bucket of wheel loader by use of DEM. – Proceedings of the 5th Asia-Pacific Regional Conference ISTVS, Seoul Korea, 1998. – <http://www2.kankyotohoku.ac.jp/htaka/Japanese/paper/htaka/pdf/2.pdf>
16. Meng, Y., Fang, H., Liang, G., Gu, Q., Liu, L. Bucket Trajectory Optimization under the Automatic Scooping of LHD // *Energies* – 2019. – V. 12. – No. 20. – 3919. – <https://doi.org/10.3390/en12203919>

*А. К. Салчак<sup>1,2</sup>, В. И. Ростовец<sup>1\*</sup>*

## **Особенности минерального состава полиметаллической руды и технология ее предварительного обогащения**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Обогатительная фабрика ООО «Лунсин», г. Кызыл, Республика Тыва, Российская Федерация

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\*e-mail: benevikt@misd.ru

**Аннотация.** В связи с необходимостью развития минерально-сырьевой базы России в переработку все в большей степени вовлекаются бедные, труднообогащаемые и упорные руды, в том числе и полиметаллические. Из-за сложного их минерального состава и несовершенства добычных и обогатительных технологий на предприятиях уровень потерь ценных компонентов достигает 20 и более %. Совершенствование технологических процессов переработки природного и техногенного минерального сырья является актуальной задачей. Цель исследований: обоснование применения комбинированной технологии переработки полиметаллической руды, обеспечивающей повышение технологических показателей при одновременном снижении себестоимости получения товарной продукции и улучшении экологической обстановки на предприятии. При выполнении работы использованы минералогический, флотационный, ситовый, рентгенорадиометрический (РРС), химический и другие методы исследований. Установлено, что в оптимальном режиме рентгенорадиометрическое разделение руды позволяет выделить из класса -80+20 мм порядка 20 % пород при сравнительно низких потерях (около 8 % свинца и 3 % цинка). Учитывая опыт применения РРС на ряде предприятий, предварительное обогащение с применением этого метода на отечественном оборудовании целесообразно провести на труднообогащаемых и забалансовых рудах Кызыл-Таштыгского месторождения. При этом одновременно с повышением технологических показателей будет снижена себестоимость товарной продукции из-за снижения нагрузки на основное технологическое оборудование и сокращения сбросов тонкоизмельченного материала в хвостохранилище обогатительной фабрики за счет предварительного удаления из руды пустой породы в виде крупных кусков.

**Ключевые слова:** полиметаллические руды, совершенствование переработки, предварительное обогащение, комбинирование технологических процессов, снижение себестоимости товарной продукции, улучшение экологической обстановки на предприятии

*А. К. Salchak<sup>1,2</sup>, V. I. Rostovtsev<sup>1\*</sup>*

## **Features of the mineral composition of polymetallic ore and technology of its pre-enrichment**

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation

<sup>2</sup>"Lunsin" LLC Enrichment plant, Kyzyl, Republic of Tyva, Russian Federation

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation

\*e-mail: benevikt@misd.ru

**Abstract.** Due to the need to develop the mineral resource base of Russia, poor, hard-to-enrich and stubborn ores, including polymetallic ores, are increasingly involved in processing. Due to their complex mineral composition and imperfections of mining and processing technologies at enterprises, the loss rate of valuable components reaches 20% or more. Improving the technological processes of processing natural and man-made mineral raw materials is an urgent task. The purpose of the research is to substantiate the use of a combined technology for processing polymetallic ore, which provides an increase in technological indicators while reducing the cost of obtaining marketable products and improving the environmental situation at the enterprise. Mineralogical, flotation, sieve, X-ray radiometric, chemical and other research methods were used in the performance of the work. It was found that in the optimal mode, the X-ray radiometric separation of ore makes it possible to isolate about 20% of rocks from the -80+20 mm class with relatively low losses (about 8% lead and 3% zinc). Taking into account the experience of using RRS at a number of enterprises, it is advisable to carry out preliminary enrichment using this method on domestic equipment at the difficult-to-enrich and off-balance ores of the Kyzyl-Tashtyg deposit. At the same time, along with an increase in technological indicators, the cost of commercial products will be reduced due to a reduction in the load on the main technological equipment and a reduction in discharges of finely ground material into the tailings of the concentrator due to the preliminary removal of waste rock from the ore in the form of large pieces.

**Keywords:** polymetallic ores, improvement of recycling, pre-enrichment, combining technological processes, reducing the cost of commercial products, improving the environmental situation at the enterprise

### *Введение*

Как известно, например, из [1], эффективное функционирование минерально-сырьевого комплекса России определяется уровнем развития технологий добычи и обогащения полезных ископаемых. Вероятность открытия новых крупных и богатых месторождений не велика. Поэтому, расширение минерально-сырьевой базы России возможно, главным образом, за счёт вовлечения в разработку труднообогатимых руд и нетрадиционного минерального сырья, включая техногенные образования. Данные типы руд характеризуются сложным вещественным составом, низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкрапленностью вплоть до эмульсионной и близкими физико-химическими и технологическими свойствами.

Проблема разделения минералов с близкими технологическими свойствами традиционно решается повышением селективности обогатительных и химических процессов. Научные исследования в настоящее время ведутся по нескольким направлениям: синтез реагентов направленного действия и использование энергетических методов обработки минералов, пульпы и промышленных вод.

Для эффективной реализации данных химических процессов необходимо получение новых научных знаний о процессах растворения, сорбции и экстракции ценных компонентов, и разработка нового класса эффективных флотационных реагентов, сорбентов и экстрагентов.

Одним из эффективных методов, позволяющих получать качественные концентраты из такого минерального сырья, является флотация. При этом важным фактором, определяющим эффективность флотационного процесса, является

размер свободных зерен минеральных частиц. Например, расширение диапазона крупности частиц во флотационной пульпе до 0.1 – 0.3 мм может дать экономию 30 – 50 % энергии, затрачиваемой в наиболее энергоемком переделе обогащения – процессе измельчения [2, 3].

В последние годы для направленного изменения поверхностных свойств минералов проводятся широкие исследования по использованию энергетических воздействий, таких как радиационные, ультразвуковые, электрохимические, механохимические, плазменные. И если раньше эти направления рассматривались как экзотические, то в связи с началом выпуска промышленных электрохимических кондиционеров пульпы, плазмотронов, линейных ускорителей, ультразвуковых генераторов можно говорить о реальном внедрении новых экологически безопасных технологий в процессах первичной переработки труднообогатимых руд и угля сложного вещественного состава. Дозированные физические и физико-химические воздействия на поверхность минералов изменяют их свойства в нужном направлении и позволяют перевести труднообогатимые руды в категорию рядовых руд.

В [4] указывается, что для процессов селективной дезинтеграции в ряде стран с целью создания дефектов на границе срастания минералов разрабатываются энергетические методы воздействия на минеральное сырье (СВЧ, мощные наносекундные импульсы и т.д.). Среди указанных перспективным является воздействие потоком ускоренных электронов на минеральное сырье [5-6]. Радиационные технологии определены мировым сообществом как потенциально прорывные в различных областях промышленного производства. В настоящее время радиационная обработка широко используется для модификации полимеров, стерилизации медицинских изделий, обеззараживания бытовых отходов, очистки стоков промышленных предприятий и дымовых газов. Достоинством воздействия ускоренными электронами является наличие отечественного стандартного оборудования для реализации процессов обработки минерального сырья с сохранением или незначительным изменением технологических схем и оборудования обогатительных фабрик [7-8].

Все изложенные выше направления имеют принципиальный характер для повышения эффективности обогатительных процессов, которые в настоящее время подходят к пределу своих возможностей и становятся бессильными при переработке руд с субмикрозернистой структурой.

Другим направлением поиска и развития эффективных обогатительных технологий является предварительное обогащение [9], в котором могут решаться различные задачи, из них наиболее важной и часто решаемой является задача предварительной концентрации полезных минералов в выделенном продукте. Это обеспечивает целый ряд преимуществ из-за вывода из последующего технологического процесса большей части крупных бедных хвостов. К ним относится снижение затрат на транспортировку, дробление, измельчение и обогащение, уменьшение платежей на эксплуатацию хвостохранилищ, снижение экологической нагрузки предприятий и, в конечном итоге, повышение эффективности горно-обогатительного производства. В последнее время среди используемых

методов предварительного обогащения приобретают особое значение информационные методы обогащения [9-12].

Цели и задачи исследований настоящей работы заключаются в обосновании применения предварительного обогащения, обеспечивающего не только снижение себестоимости получения конечной товарной продукции за счет предварительного удаления пустой породы из руды и повышения технологических и технико-экономических показателей процесса обогащения руды, но и снижение негативного влияния обогатительных предприятий на окружающую среду.

### **Методы и материалы**

Объектом исследований являлась полиметаллическая руда одного из месторождений Республики Тыва со следующим содержанием основных полезных компонентов в %: свинца – 1.28-1.47, цинка – 8.63-10.13, меди – 0.56-0.66. Для исследованной руды характерна тонкозернистая (0.04-0.01 мм) и в меньшей мере мелкозернистая структура.

Минеральный и химический составы технологической пробы приведены в таблицах 1 и 2.

*Таблица 1*

Минеральный состав пробы полиметаллической руды

Наименование минерала	Содержание, %
Пирит	23.5
Сфалерит	13.3
Халькопирит	1.0
Галенит	1.8
Барит	3.5
Халькозин	0.4
Кварц	10.2
Хлорит	2.0
Магнетит, серицит	Единичные зерна

Анализ данных, представленных в таблице 1, показывает, что основными рудными минералами являются пирит, сфалерит, галенит и халькопирит. Нерудные минералы – кварц, барит, серицит, хлорит.

Руда характеризуется тонкой вкрапленностью минералов, особенно сульфидных минералов между собой.

Фазовым анализом определено, что цинк на 90 % представлен сульфидной формой в виде сфалерита, медь в основном содержится в виде халькопирита, частично – в виде халькозина. Свинец на 25 % находится в окисленной форме.

Таблица 2

## Химический состав пробы полиметаллической руды

Элементы и соединения	Содержание, %
Свинец	1.50
Цинк	8.90
Медь	0.68
Диоксид кремния	27.61
Оксид железа	11.69
Сера	18.00
Оксид кальция	53.33
Оксид магния	4.88
Оксид алюминия	4.98
Оксид бария	2.31
Кадмий	0.03
Селен	0.07
Серебро, г/т	50
Золото, г/т	1.0

Гранулометрическая характеристика исходной дробленной до крупности -2 мм руды показана в таблице 3.

Таблица 3

## Гранулометрический состав дробленной до крупности -2 мм пробы полиметаллической руды

Класс, мм	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
+1	19.3	0.64	1.39	8.96	18.2	18.0	19.5
-1+0.5	24.6	0.67	1.38	8.84	24.4	22.7	24.5
-0.5+0.2	17.3	0.65	1.32	8.72	16.6	15.1	17.0
-0.2+0.14	4.6	0.63	1.49	8.81	4.3	4.6	4.6
-0.14+0.074	6.8	0.65	1.39	9.11	6.5	6.3	7.0
-0.074+0.044	6.4	0.69	1.59	9.27	6.5	6.8	6.7
-0.044	21.0	0.76	1.89	8.76	23.5	26.5	20.7
ИТОГО	100.0	0.68	1.50	8.90	100.0	100.0	100.0

Анализ данных таблицы 3 показывает, что распределение металлов по классам крупности пропорционально выходам. Содержание металлов равномерное за исключением флотационного класса -0.074 мм, в котором наблюдается повышенное содержание меди (0,69 - 0,76 %) и свинца (1.59 – 1.89 %). Следует отметить, что в классе -0.074 мм сосредоточено от 27.4 до 33.3 % полезных минералов.

С учетом особенностей минерального состава и согласно действующего технологического регламента [13], обогащение полиметаллических руд Кызыл-Таштыгского месторождения происходит по схеме коллективно-селективной бесцианидной флотации с получением кондиционных медного, цинкового и свинцового концентратов. Технологическая схема предусматривает 2-х стадийное измельчение руды до крупности 95% класса минус 0,074 мм, основную медно-свинцовую флотацию с 4-мя перечистками коллективного концентрата, доизмельчение коллективного медно-свинцового концентрата до крупности 90% класса минус 0,044 мм, селективный цикл флотации с получением медного и свинцового концентратов, цикл цинковой флотации с доизмельчением камерного продукта медно-свинцовой флотации до крупности 90% класса минус 0,044 мм, и 3-мя перечистками цинкового концентрата.

Технологические показатели обогащения руды приведены в таблице 4.

*Таблица 4*

Технологические показатели обогащения полиметаллической руды

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu
Цинковый концентрат	13.8	54.47	1.05	1.16	84.5	9.7	23.5
Свинцовый концентрат	2.3	7.78	42.5	3.02	2.0	65.2	10.2
Медный концентрат	1.7	8.0	4.09	24.16	1.5	4.6	60.4
Хвосты	82.2	1.3	0.374	0.048	12.0	20.5	5.9
Исходная руда	100.0	8.9	1.5	0.68	100.0	100.0	100.0

### *Результаты и их обсуждение*

Анализ данных таблицы 4 показывает, что извлечение металлов в одноименные концентраты сравнительно низкое, что связано с их потерями в хвостах. Низкие показатели по извлечению металлов в концентраты несмотря на достаточно тонкое измельчение, достигающее 90-95% класса -44 мкм, связано с минералогическими особенностями руды, характеризующимися ее трудной обогатимостью и упорностью.

Как указывалось выше для комплексного использования минерального сырья и повышения технологических показателей его переработки в последнее время проводят предварительное обогащение. При этом наибольшее широко применяется рентгенорадиометрическая сепарация (РРС) [14-15]. В настоящей работе для повышения качества перерабатываемых руд и расширения минерально-сырьевой базы испытывался сепаратор СРФ2-150, являющийся полным аналогом промышленных сепараторов, производимых в России фирмой РАДОС.

Результаты исследований приведены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты испытаний по рентгенорадиометрическому разделению пробы полиметаллической руды

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Pb	Zn	Pb	Zn
Серия 1					
Обогащенный продукт	80.5	1.68	10.74	93.27	97.15
Хвосты	19.5	0.50	1.30	6.73	2.85
Исходная руда (-80+20 мм)	100.0	1.45	8.90	100.0	100.0
Серия 2					
Обогащенный продукт	76.6	1.72	11.19	90.96	96.29
Хвосты	23.4	0.56	1.41	9.04	3.71
Исходная руда (-80+20 мм)	100.0	1.45	8.90	100.0	100.0

### *Заключение*

Результаты поисковых исследований, показанных в таблице 5, показывают, что при использовании РРС на руде текущей добычи можно выделить порядка 20 % пород от руды крупностью -80+20 мм при потерях около 8 % свинца и 3 % цинка.

Учитывая опыт реализации РРС на ряде предприятий, предварительное обогащение с применением этого метода на отечественном оборудовании целесообразно провести на труднообогатимых и забалансовых рудах Кызыл-Таштыгского месторождения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чантурия В. А. Роль инновационных технологий обогащения и глубокой переработки минерального сырья в развитии минерально-сырьевой базы России / Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья. Материалы Международной конференции (Плаксинские чтения – 2023). – М.: Издательство «Спутник +», 2023. – С. 3-6.

2. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П. Взаимодействие минеральной частицы со свободным пузырьком воздуха в жидкости / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 6. С. 125–135.

3. Салчак А.К., Ростовцев В.И. Интенсификация рудоподготовки и обогащения полиметаллических руд путем сочетания рентгенорадиометрической сепарации и флотации / Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья. Материалы Международной конференции (Плаксинские чтения – 2023). – М.: Издательство «Спутник +», 2023. – С. 225-229.
4. Чантурия В. А. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава / Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2020). – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. – С. 3–4.
5. Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Коваленко К. А. Развитие экологически безопасных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья / Горный журнал. – 2020. – № 5. С. 39-46.
6. Чантурия В. А., Бунин И. Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 3. С. 107–128.
7. Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Брызгин А. А. Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН / Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – № 6. – С. 672-685.
8. Безуглов В. В., Брызгин А. А., Власов А. Ю., Воронин Л. А., Коробейников М.В. и др. Радиационные технологии и оборудование / Вопросы атомной науки и техники. Техническая физика и автоматизация. – М.: АО «НИИТФА», 2018. – Вып. 83. – С. 4-21.
9. Скопов С.В. Обогащение минерального сырья и техногенных отходов на ЗАО НПК «ТЕХНОГЕН» – Материалы III Международной научно-технической конференции «Рентгенорадиометрическая сепарация минерального сырья и техногенных отходов», г. Екатеринбург – 2007. – С. 22-32.
10. Цыпин Е.Ф., Ефремова Т.А., Елизаров Д.Б., Овчинникова Т.Ю. Связь показателей рентгенорадиометрической сепарации с крупностью сортируемых классов / Известия вузов. Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 77-84.
11. Максимов И. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 1) // Обогащение руд. 2015. № 3. С. 3–11.
12. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Елизаров Д. Б. Кластер информационных методов обогащения полезных ископаемых // ГИАБ. 2017. Спец. вып. № 23. С. 483–492.
13. Технологический регламент на технологию обогащения полиметаллических руд Кызыл-Таштыгского месторождения. – Красноярск – 2011. – 114 с.
14. Федоров Ю. О., Кацер И. У., Коренев О. В., Короткевич В. А., Цой В. П., Ковалев П. И., Федоров М. Ю., Поповский Н. С. Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия вузов. Горный журнал. 2005. № 5. С. 21–37.
15. Федоров Ю. О., Цой В. П. и др. Рудосортировочные комплексы – эффективное средство для реализации технологии предварительного обогащения бедных забалансовых руд. В кн. Состояние и развитие открытой добычи полезных ископаемых в рыночной экономике / Сборник докладов Международной конференции – Болгария: Варна. – 1998. – С. 306-314.

© А. К. Салчак, В. И. Ростовцев, 2024

*И. М. Сердюк<sup>1,2\*</sup>, С. В. Сердюков<sup>1</sup>, К. А. Райко<sup>1,2</sup>*

## **Исследование акустической эмиссии при трехосном испытании дисперсных грунтов**

<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\*e-mail: ken04588@gmail.com

**Аннотация.** Проблема контроля нелинейных процессов при нагружении дисперсных грунтов является актуальной для промышленного и гражданского строительства. Один из способов для контроля является регистрация акустической эмиссии, которая возникает в результате перестройки среды. Был разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий производить регистрацию акустической эмиссии при проведении испытаний дисперсных грунтов методом трехосного сжатия. Выполнены тестовые эксперименты для апробации созданного комплекса. В качестве образцов для эксперимента выступал просеянный песок, давление обжима составляло от 10 до 500 кПа. Была установлена взаимосвязь между нагружением образца и регистрируемой мощностью АЭ.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, пески, трехосное сжатие

*I. M. Serdyuk<sup>1,2\*</sup>, S. V. Serdyukov<sup>1</sup>, K. A. Rayko<sup>1,2</sup>*

## **Investigation of acoustic emission during triaxial testing of dispersed soils**

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

\* e-mail: ken04588@gmail.com

**Annotation.** The problem of controlling nonlinear processes during loading of dispersed soils is relevant for industrial and civil construction. One of the methods for monitoring is the registration of acoustic emission, which occurs as a result of the restructuring of the environment. A hardware and software complex has been developed that allows recording acoustic emissions during testing of dispersed soils using the triaxial compression method. Test experiments were performed to test the created complex. The samples for the experiment were sifted sand, the crimping pressure ranged from 10 to 500 kPa. The relationship between the loading of the sample and the recorded AE power was established.

**Keywords:** acoustic emission, sands, triaxial compression

### ***Введение***

Основными параметрами, регистрируемыми при моделировании разрушения рыхлых пород, являются (осевое) эффективное сжатие цилиндрического образца, его боковое обжатие, девиатор напряжений, поровое давление, вертикальная (осевая) и объемная деформация [1, 2]. Указанных параметров достаточно

для контроля процесса накопления упругой энергии деформации породного образца. Для оценки влияния нелинейных процессов при разрушении пород дополнительно используют тепловой и акустический мониторинг. Акустическая эмиссия (АЭ) возникает вследствие динамической локальной перестройки структуры среды [3], образования и накопления в деформируемом образце дислокаций, его разрушения. Наличие связей между параметрами источников акустического излучения и характеристиками генерируемых ими сигналов является основой для использования АЭ при неразрушающем контроле сред [4]. Для регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии существуют несколько подходов. Это наблюдение полной волновой формы акустических колебаний в широком диапазоне частот, метод подсчета всплесков излучения (импульсов), превышающих заданный амплитудный порог, параллельный анализ – метод регистрации интегральных характеристик (например, средней мощности) излучения в заданных частотных диапазонах, с усреднением по временным отрезкам. Для мониторинга энергии акустического излучения при моделировании разрушения образцов рыхлых пород нами был выбран последний подход ввиду того, что объем регистрируемой и обрабатываемой информации на порядок ниже, чем при изучении полной волновой формы сигнала. Данная работа посвящена разработке технических средств исследования АЭ при испытании дисперсных грунтов методом трехосного сжатия.

### *Методы и материалы*

Испытания дисперсных грунтов методом трехосного сжатия в институте горного дела СО РАН проводят на установке НПП Геотек ГТ 1.3.5, для исследования АЭ в ходе проведения работ был разработан дополнительный блок, который включает в себя акустические пьезокерамические преобразователи, датчик силы и датчик линейных перемещений. В основе регистрирующей аппаратуры лежит крейт и 16-ти разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с быстродействием до 1.25 миллионов отсчетов в секунду производства National Instruments. С учетом 4-х задействованных каналов, это позволяет довести частоту дискретизации данных до 310 кГц, что соответствует полосе пропускания сигналов 0-155 кГц. Этого достаточно, чтобы перекрыть частотный диапазон измерений используемых акустических преобразователей. Управление системой сбора данных выполняет виртуальный прибор, созданный в программной среде LabView, на рисунке 1 показан основной функционал этого прибора.

Для реализации подхода по изучению АЭ была произведена разбивка каждого акустического канала на 10 параллельно соединённых виртуальных суб-приборов, которые на входе получают общую мощность входного сигнала в пределах заданного диапазона частот. После чего происходит оценка текущей плотности энергии акустического излучения в точке приема по зарегистрированным данным, однако для общей оценки энергии АЭ необходимо суммировать полученные плотности по частотным полосам и интегрировать по времени длительности акустического процесса.

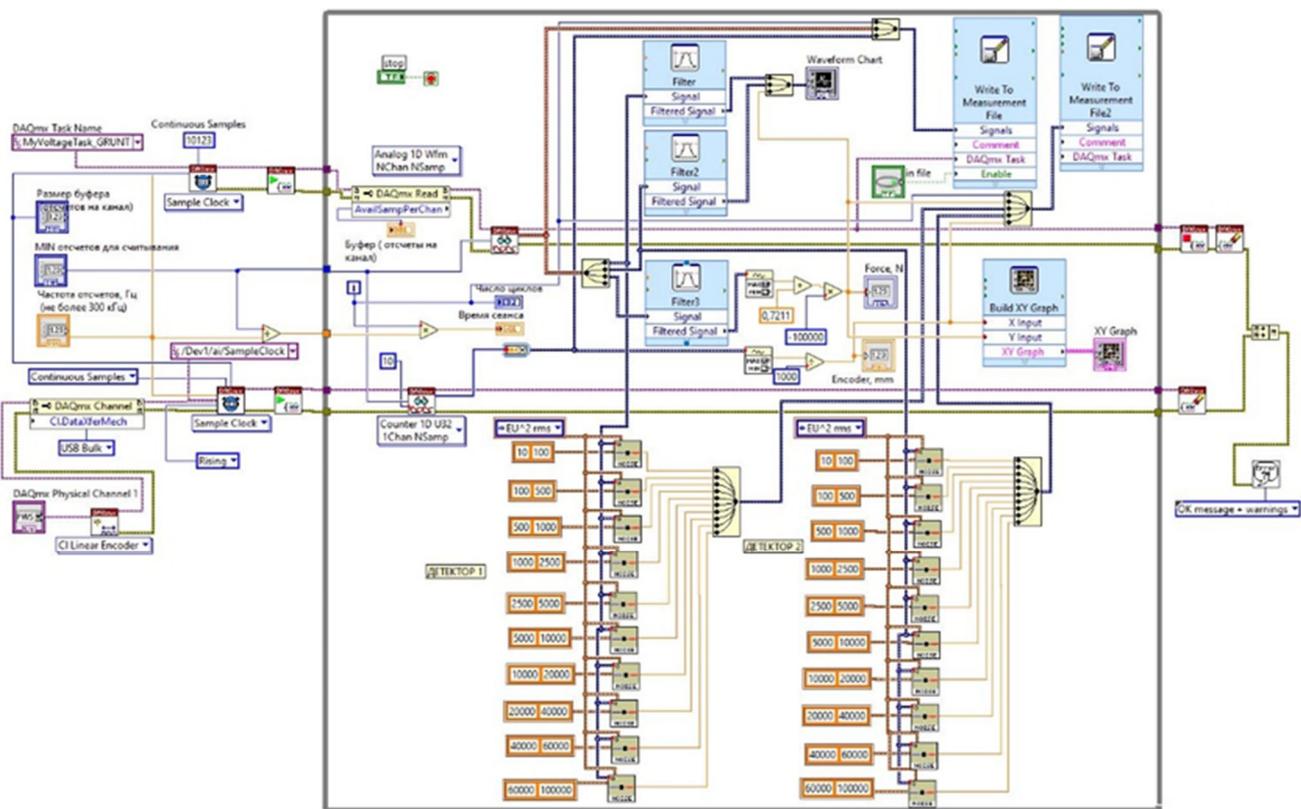


Рис.6 G-код виртуального прибора системы регистрации сигналов дополнительного блока датчик

### Экспериментальные исследования

Для апробации полученного комплекса были проведены серии экспериментальных работ по моделированию разрушению дисперсных грунтов. Работы проводились на просеянном речном песке мелкой, средней и крупной фракции. Объем дисперсного грунта формировался в цилиндрический образец диаметром 50 мм и высотой 100 мм. Эксперименты проводились с боковым обжатием образца 10, 100 и 500 кПа при постоянной скорости нагрузки 1 мм/мин. Результатами проведенных исследований являются графики зависимостей мощности, выделяемой АЭ, от прилагаемых нагрузок. На рисунке 2 показан график мощности акустического излучения со стадиями деформирования образца при боковом обжатии 100 кПа.

На графике отчетливо заметно, что для первой стадии нагружения характерно отсутствие акустической эмиссии, на второй стадии появляются всплески АЭ, что говорит об возникновении разрывных нарушений среды. Для отдельных стадий нагрузки характерна непрерывная мощность акустического излучения. Завершение нагружения связано с резким снижением АЭ, что дает нам возможность при интерпретации полученных данных выделять стадийность нагрузки не только по изучению особенностей деформационной кривой, но и по акустическому излучению.

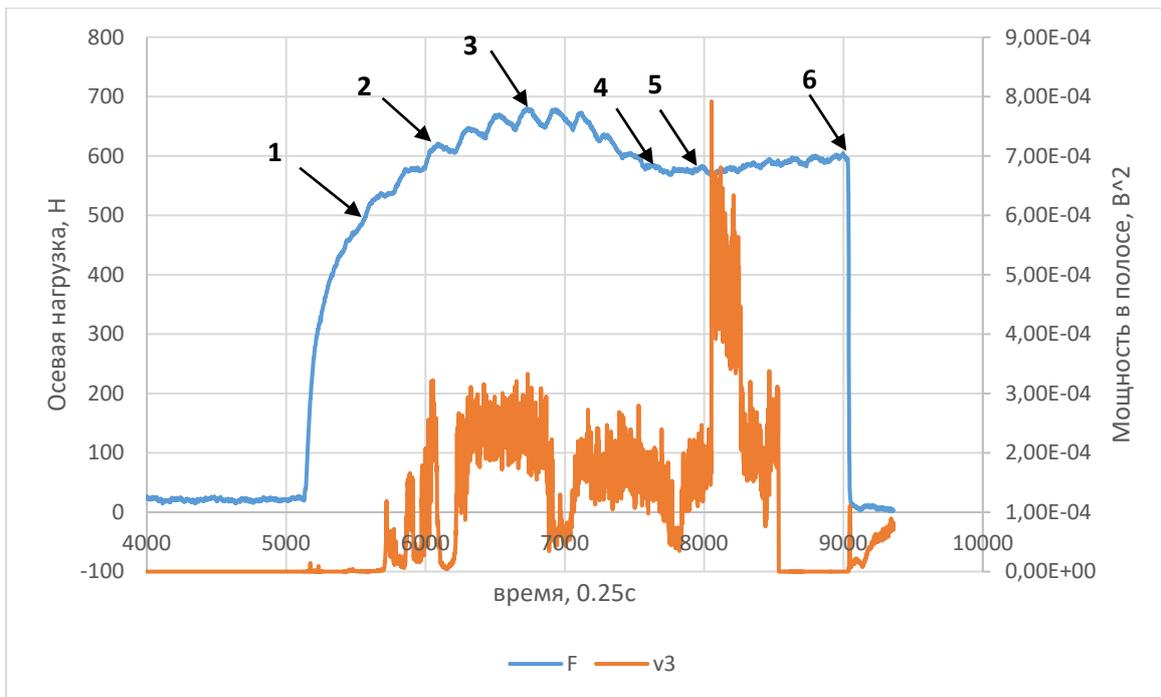


Рис. 7 Временные графики изменения осевой нагрузки образца и мощности вертикальной компоненты акустического сигнала в частотной полосе [500; 1000] Гц

### Заключение

Были разработаны аппаратно-программный комплекс и методика мониторинга энергии акустического излучения при моделировании разрушения рыхлых горных пород. В ходе проведения тестовых экспериментов была установлена взаимосвязь между нагружением образца и регистрируемой мощностью АЭ. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение АЭ при различных состояниях дисперсных грунтов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 12248-2410. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости // Стандартиформ, 2011. – 78с.
2. ГОСТ 12248.3-2020. ГРУНТЫ. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. // Стандартиформ, 2020. – 29с.
3. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, Ковалев А. В. // Машиностроение, 2005. - 656 с.
4. Алешин, Н. П. Методы акустического контроля металлов / Алешин Н. П., Белый В. Е., Вopilкин А. Х. // Машиностроение, 1989. -455 с.

© И. М. Сердюк, С. В. Сердюков, К. А. Райко, 2024

*А. А. Скулкин<sup>1</sup>, Е. В. Рубцова<sup>1\*</sup>*

## **Лабораторные испытания герметизирующих элементов скважинного зонда для выполнения измерительного гидроразрыва**

<sup>1</sup>ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\*e-mail: rubth@misd.ru

**Аннотация.** Приведена конструкция настольного лабораторного стенда для испытания скважинных зондов в составе комплекса «Гидроразрыв». В экспериментах использован полноразмерный двусторонний зонд, оснащенный пакерами из полиуретанового эластомера (твердость по шкале Шора 60 ShA) двух типов: цельной конструкции и составной из коротких уплотнительных элементов, разделенных металлическими шайбами. Установлен характер передачи давления на «скважину» при осевом сжатии герметизирующих элементов. В контакт со «скважиной» вначале приходит срединная часть цельного пакера, затем его краевые части. Составной пакер вступает в контакт со стенкой «скважины» одновременно срединными точками всех составных элементов. При давлении в распорном гидроцилиндре свыше 25 МПа коэффициент передачи давления на стенки «скважины» составного пакера значительно выше, чем цельного. Результаты лабораторных экспериментов подтверждают перспективность оснащения скважинных зондов для выполнения измерительного гидроразрыва составными пакерными элементами, преимуществом которых является также более высокая ремонтпригодность и низкая стоимость изготовления.

**Ключевые слова:** измерительный гидроразрыв, зонд, скважина, уплотнительный элемент, составной пакер, осевое сжатие, датчик давления

*A. A. Skulkin<sup>1</sup>, E. V. Rubtsova<sup>1\*</sup>*

## **Laboratory testing of sealing elements of the borehole probe for measuring hydraulic fracturing**

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russian Federation  
\*e-mail: rubth@misd.ru

**Abstract.** The design of a desktop laboratory stands for testing borehole probes as part of the “Hydraulic fracturing” complex is presented. In the experiments, a full-size double-sided probe was used, equipped with packers made of polyurethane elastomer (Shore hardness 60 ShA) of two types: a solid structure and a compound of short sealing elements separated by metal washers. The nature of the pressure transfer to the “borehole” during axial compression of the sealing elements has been established. The middle part of the solid packer comes into contact with the “borehole” first, then its edge parts. The composite packer comes into contact with the “borehole” wall at the same time as the midpoints of all its constituent elements. When the pressure in the spacer hydraulic cylinder is over 25 MPa, the pressure transfer coefficient to the walls of the “borehole” of a composite packer is significantly higher than that of a solid one. The results of laboratory experiments confirm the prospects of equipping downhole probes for measuring hydraulic fracturing with composite packer elements, the advantage of which is also higher maintainability and low manufacturing cost.

**Keywords:** measuring hydraulic fracturing, probe, borehole, packing element, compound packer, axial compression, pressure sensor

## *Введение*

Одним из известных и активно развиваемых методов инструментального контроля напряжений в массиве горных пород является измерительный гидроразрыв. Технически метод может быть реализован на значительных расстояниях от контура выработок, при этом возможны повторные замеры на выбранном интервале скважины, что повышает достоверность экспериментальных данных. Исследованию метода посвящены работы отечественных [1-5] и зарубежных авторов [6-10].

Для реализации измерительного гидроразрыва в рудничных условиях в ИГД СО РАН разработан измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» [11]. Основным техническим средством в составе комплекса является скважинный зонд. При выполнении измерительного гидроразрыва зонд размещается в скважине на заданном расстоянии от кровли выработки, при помощи размещенных на корпусе зонда уплотнительных элементов (пакеров) герметизируют интервал скважины и нагружают его рабочим флюидом до достижения критических растягивающих напряжений, приводящих к образованию трещины гидроразрыва на стенке скважины. В конструкции скважинных зондов для измерительного гидроразрыва, разработанных в ИГД СО РАН, используются уплотнительные элементы зажимного типа из полиуретанового эластомера [12]. Конструктивно уплотнительный элемент представляет собой толстостенный цилиндр (твердость по шкале Шора 40-60 ShA), торцевые части которого выполнены более жесткими (твердость по шкале Шора до 80 ShA), что препятствует выдавливанию торцевых участков уплотнительных элементов при осевом сжатии в зазор между корпусом зонда и стенками скважины.

Для обеспечения герметизации исследуемого интервала скважины необходим надежный контакт пакера со стенкой скважины, исключающий проникновение рабочей жидкости в зону контакта или за его пределы («обыгрывание» пакера). Методом численного моделирования характера развития трещин гидроразрыва показано, что предотвращение эффекта «обыгрывания» пакеров обеспечивается при длине герметизирующих элементов более  $3,75d$  ( $d$  – диаметров скважины) [13]. Однако при таких осевых размерах и большом кольцевом зазоре между эластомером и поверхностью скважины возникает проблема потери устойчивости уплотнительного элемента – его волнообразная деформация.

Для стабилизации цилиндрической формы уплотнительных элементов из полиуретанового эластомера при сжатии Леконцевым Ю.М. (ИГД СО РАН) предложено армировать их металлическими пружинами [14]. Уход от проблемы потери устойчивости возможен также за счет уменьшения осевого размера уплотнительного элемента путем компоновки зонда составными пакерами в виде коротких полиуретановых цилиндров с разделительными металлическими вставками между ними. Исследовательский интерес представляет изучение вопроса

надежности герметизации межпакерного интервала при использовании составных пакеров.

В настоящей работе приведены результаты лабораторных экспериментов по исследованию воздействия на стенки «скважины» составных и цельных герметизирующих элементов зонда при их осевом сжатии.

### *Стенд и методика лабораторных исследований*

Лабораторные эксперименты выполнялись на настольном стенде (рис. 1).

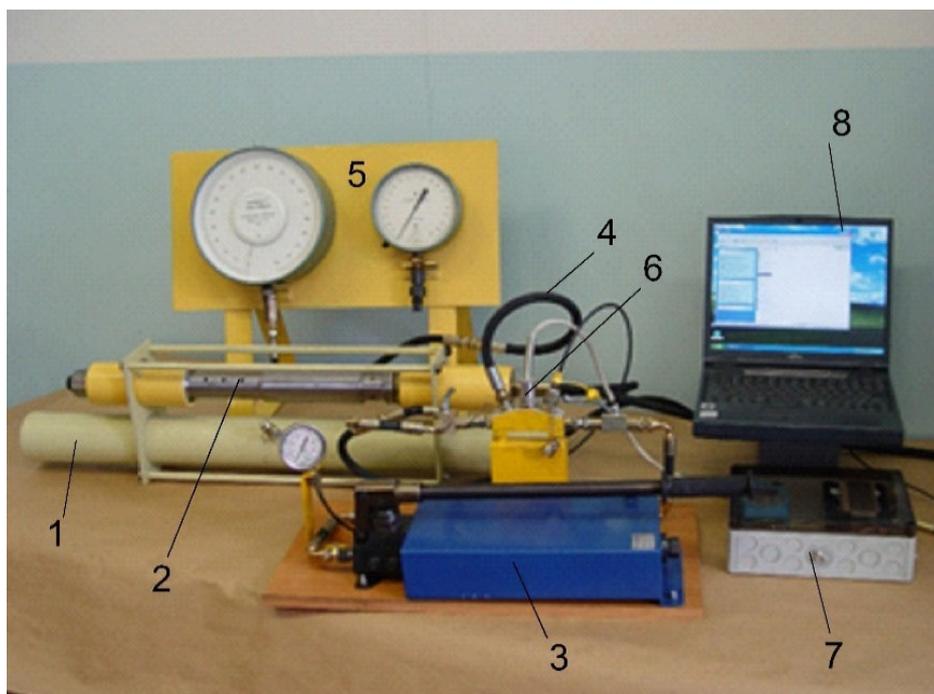


Рис 1. Настольный стенд для испытания скважинных зондов: 1 – труба для размещения скважинного зонда; 2 – распорный гидроцилиндр; 3 – ручной насос; 4 – рукава высокого давления; 5 – образцовые манометры; 6 – датчик давления в системе подачи флюида в распорный гидроцилиндр; 7 – устройство преобразования и передачи данных; 8 – портативный компьютер

В экспериментах использовался полноразмерный двусторонний скважинный зонд, который помещался в толстостенную металлическую трубу, имитирующую измерительную «скважину» диаметром 76 мм (стандартный размер скважин алмазного бурения). Зонд был оснащен пакерами двух типов: цельной конструкции из полиуретанового эластомера (твердость по шкале Шора 60 ShA) и составного типа. Последний состоял из трех герметизирующих элементов (материал аналогичный цельному пакеру), каждый длиной порядка одного диаметра «скважины», и металлических шайб между ними.

Функциональная схема испытаний скважинного зонда с различным исполнением герметизирующих элементов приведена на рис. 2. Для составного пакера контрольные сечения (отверстия в трубе для установки датчиков давления) вы-

бирались в срединной части каждого из герметизирующих элементов. Аналогично три контрольных сечения назначались по длине цельного пакера. Давление в каналах 9 и 10 создавалось ручным насосом. При подаче давления в распорный гидроцилиндр по каналу 9 происходило сжатие пакеров. По каналу 10 осуществлялась подача рабочего флюида в межпакерный интервал после завершения пакеровки. В ходе испытаний фиксировались показания датчиков давления в контрольных сечениях при росте давления в распорном гидроцилиндре, а также в процессе увеличения давления в межпакерном интервале после изоляции участка «скважины».

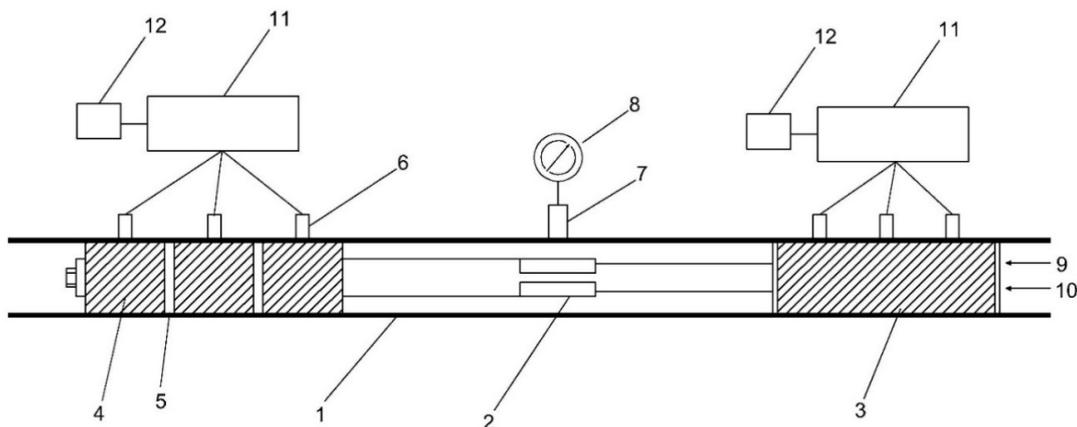


Рис 2. Функциональная схема испытаний скважинного зонда с разным исполнением герметизирующих элементов: 1 – металлическая труба; 2 – распорный гидроцилиндр; 3 – цельный герметизирующий элемент; 4 – элемент составного типа; 5 – металлические шайбы; 6 – датчики давления типа ЛХ-417; 7 – адаптер; 8 – манометр; 9 – канал подачи рабочего флюида в распорный цилиндр; 10 – канал подачи рабочего флюида в межпакерный интервал; 11 – устройство преобразования и передачи данных; 12 – портативный компьютер

### *Результаты экспериментов*

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости величины давления в контрольных сечениях трубы, имитирующей скважину, от давления в распорном гидроцилиндре. Данные зависимости показывают характер воздействия сжимаемых уплотнительных элементов на стенки «скважины».

Анализируя полученные диаграммы, можно отметить, что при осевом сжатии давление на «скважину» цельного герметизирующего элемента передается неравномерно. В контакт со «скважиной» вначале приходит срединная часть цельного пакера, затем его краевые части. Составной пакер вступает в контакт со стенкой «скважины» одновременно срединными точками всех составных элементов. При подаче давления в распорный гидроцилиндр свыше 25 МПа наблюдается резкий рост давления на стенки «скважины» у составного пакера, в сравнении с цельным, что говорит о более быстром достижении надежной герметизации исследуемого участка «скважины» составным пакером (рис. 3).

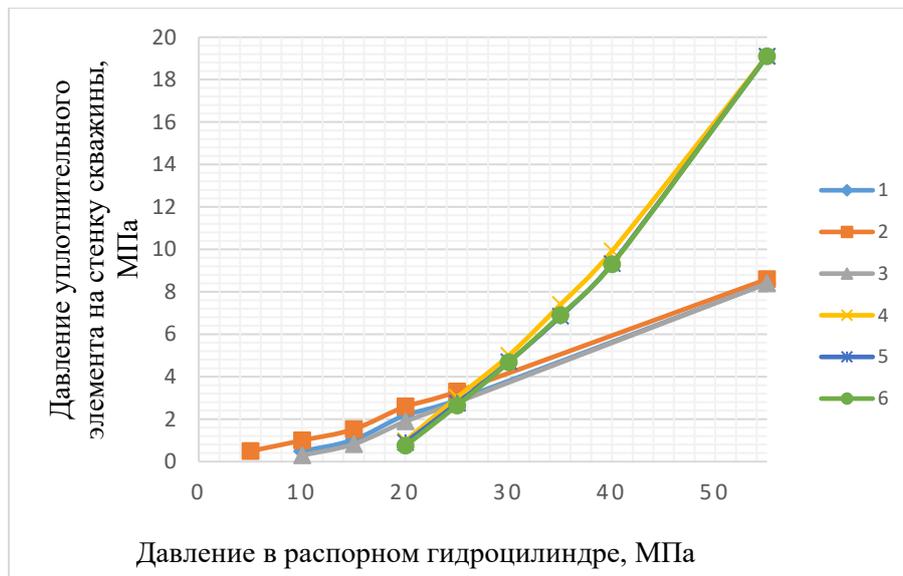


Рис. 3. Характер воздействия сжимаемых пакеров на стенки «скважины»: 1, 2, 3 – внешнее, срединное и внутреннее сечения сплошного пакера; 4, 5, 6 – внутреннее, срединное и внешнее сечения составного пакера

После изоляции участка «скважины» (при давлении уплотнительных элементов на стенки «скважины» 8,6 МПа) рабочий флюид под давлением подавался по каналу 10 в межпакерный интервал, что приводило к дополнительному поджатию уплотнительных элементов. Воздействие пакеров на стенки «скважины» при изменении рабочего давления в межпакерном интервале проиллюстрировано на рис. 4.

Как можно видеть, характер воздействия на стенки «скважины» цельного и составного пакеров при увеличении давления в межпакерном интервале идентичен. Оба типа пакеров показывают усиление степени воздействия на «скважину» при увеличении давления в межпакерном интервале свыше 25 МПа. Чрезмерный рост давления в межпакерном интервале может привести к расклиниванию уплотнительных элементов. Этот вопрос требует дополнительных экспериментов с целью определения величины допустимого хода поршня распорного гидроцилиндра и совершенствования конструкции скважинного зонда.

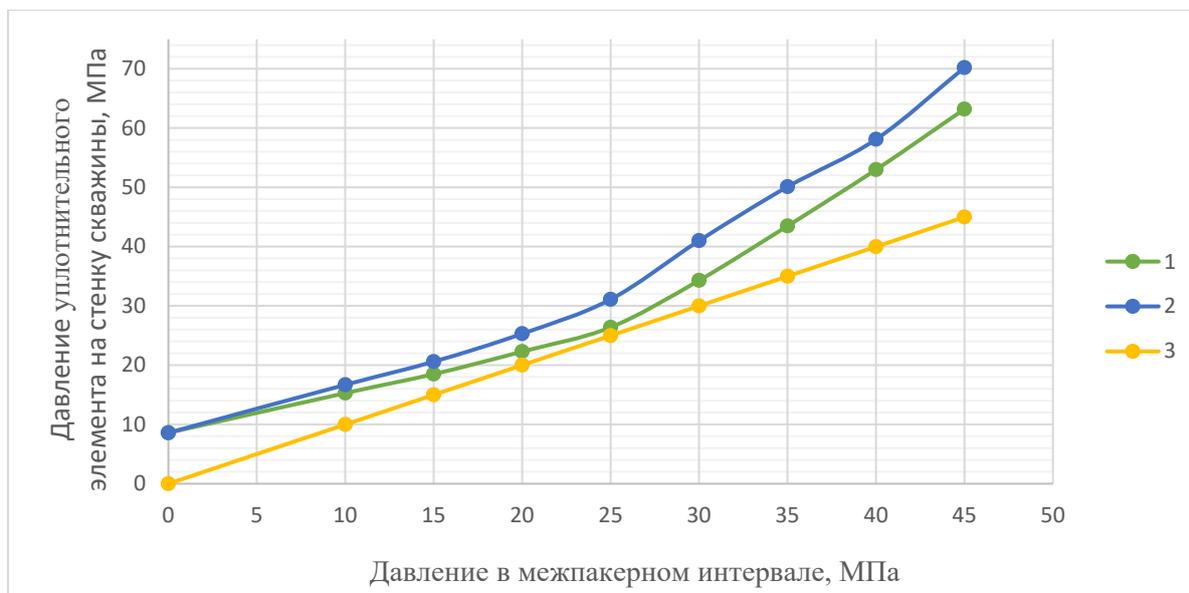


Рис. 4. Воздействие уплотнительных элементов на стенки «скважины» при повышении давления рабочего флюида в межпакерном интервале: 1 – сплошной пакер; 2 – составной пакер; 3 – давление в межпакерном интервале

### Заключение

Выполненный цикл лабораторных экспериментов позволил сравнить характер воздействия пакеров на стенки «скважины» при их различном конструктивном исполнении.

Показано, что при сжатии цельного уплотнительного элемента из полиуретанового эластомера твердостью по шкале Шора 60 ShA в контакт со «скважиной» вначале приходит срединная часть пакера, затем его краевые части. Составной пакер вступает в контакт со стенкой «скважины» одновременно средними точками составных элементов, при этом наблюдается больший коэффициент передачи давления от осевого поджатия на стенки «скважины», чем в цельном.

Конструкция скважинного зонда с составными пакерными элементами в виде коротких цилиндров из полиуретанового эластомера с разделительными металлическими вставками между ними представляется перспективной. Ее достоинствами также являются более высокая ремонтпригодность и низкая стоимость изготовления уплотнительных элементов без армирования пружинами.

Выполненное исследование имеет практическую значимость для усовершенствования конструкции скважинных зондов в составе комплекса «Гидроразрыв», являющегося единственной отечественной разработкой, применяемой в рудничных условиях для оценки напряжений в массиве горных пород методом измерительного гидроразрыва.

*Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 124020700085-5).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опарин В. Н., Журавков М. А., Потапов В. П., Каленицкий А. А. и др. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горно-технических и природных системах. Рос. акад. наук Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018 – 549 с.
2. Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // ФТПРПИ. – 2016. – № 6 – С. 1-10.
3. Рубцова Е. В., Скулкин А. А. Развитие методических основ измерительного гидроразрыва // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 5. – С. 188-191.
4. Leontiev A. V., Rubtsova E. V. and Lekontsev Yu. M. Improvement of downhole probe control system for the measurement of hydraulic fracturing at considerable distances from the working contour, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Sci., 2021, vol. 773, 012014.
5. Панов А.В., Мирошниченко Н.А., Скулкин А.А. Способ интерпретации данных множественного измерительного гидроразрыва для определения полного тензора напряжений в породном массиве // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов в 8 т. Т. 2, № 3. – Новосибирск: СГУГИТ. – 2022. – С. 242-249.
6. Haimson B.C., Cornet F.H. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation – Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTRF) // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2003. – № 40. – P. 1012-1020.
7. Synn J. H., Park C., Jung Y. B., Sunwoo C., Kim K. S., Choi S. Y., Song M. K., Shin I. J., Rutqvist J. Integrated 3-D stress determination by hydraulic fracturing in multiple inclined boreholes beneath an underground cavern // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2015. – № 75. – P. 44-55.
8. Yokoyama T., Sakaguchi K., Ito T. Re-Opening and Shut-in Behaviors under a Large Ratio of Principal Stresses in a Hydraulic Fracturing Test. Symposium of the International Society for Rock Mechanics. Proceeding Engineering. – 2017. – № 191. – P. 862-868.
9. Heng S., Vang C., Wang L. and Daemen J.J.K. Experimental study on the hydraulic fracture propagation in shale // Current Science. – 2018. – Vol. 115, No 3 – P. 465-475.
10. Krietsch H, Gischig V., Evans K., Doetsch J., Dutler N. O., Valley B., Amann F. Stress Measurements for an In Situ Stimulation Experiment in Crystalline Rock: Integration of Induced Seismicity, Stress Relief and Hydraulic Methods // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2019. – № 52(2). – P. 517-542.
11. Леонтьев А. В., Рубцова Е. В., Леконцев Ю. М., Качальский В. Г. Измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 1. – С. 104-110.
12. Рубцова Е.В., Скулкин А.А. Современное оснащение измерительно-вычислительного комплекса "Гидроразрыв" и опыт его применения при экспериментальном исследовании действующих полей напряжений в соляном массиве // Проблемы недропользования [Сетевое периодическое научное издание]. – Екатеринбург: ИГД Уро РАН. – 2018. – № 1(16). – С. 51-58. – Режим доступа: [https://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=52020](https://elibrary.ru/title_about.asp?id=52020).
13. Зиновьев А.А., Патутин А.В., Сердюков С.В. Численное моделирование процесса разгрузки угле-породного массива // Интерэкспо ГЕО Сибирь–2012. VIII Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: сб. материалов в 2 т. Т.2. – Новосибирск: СГГА. – 2012. – С. 174 – 178.
14. Леконцев Ю.М., Ушаков С.Ю., Мезенцев Ю.Б. Совершенствование технологии дегазации угольных пластов // Научно-технический и методический журнал «Рациональное освоение недр». – М. – 2019. – № 6. – С. 80–82.

© А. А. Скулкин, Е. В. Рубцова, 2024

*А. И. Чанышев<sup>1,2\*</sup>, И. М. Абдулин<sup>1</sup>, Л. В. Городилов<sup>1</sup>, О. Е. Белоусова<sup>1</sup>, О. А. Лукьяшко<sup>1</sup>*

## **К вопросу определения приложенных нагрузок к массиву пород, его структуры по данным измерений смещений на контуре цилиндрической выработки**

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет экономики и управления, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

**Аннотация.** Существующие методы расчетов напряженно-деформированного состояния массивов горных пород вокруг выработок предполагают знание условий нагружения в отдаленных точках, что оказывается невозможным в реальных условиях. От этих условий зависит прогноз состояния вблизи самих выработок, включая предсказание катастрофических событий. В работе показывается, что для прогноза состояния массива пород вблизи выработки не требуется уходить на «бесконечность», достаточно проанализировать то, что происходит на границе выработки. Требуется определить нормальные и тангенциальные смещения на ее контуре. С применением этих данных и при условии, что поверхность выработки свободна от напряжений восстанавливается напряженно-деформированное состояние массива горных пород вокруг выработки и его структура.

**Ключевые слова:** напряжения, деформации, смещения, анализ, прогноз, структура

*A. I. Chanyshev<sup>1\*</sup>, I. M. Abdulin<sup>1</sup>, L. V. Gorodilov<sup>1</sup>, O. E. Belousova<sup>1</sup>, O. A. Lukyashko<sup>1</sup>*

## **On the issue of determining applied loads to a rock mass and its structure based on displacement measurements on the contour of a cylindrical excavation**

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University of Economics and Management, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

**Annotation.** Existing methods for calculating the stress-strain state of rock masses around workings require knowledge of loading conditions at distant points, which turns out to be impossible in real conditions. The forecast of the state near the workings themselves, including the prediction of catastrophic events, depends on these conditions. The work shows that to predict the state of a rock mass near a mine working, it is not necessary to go to “infinity”; it is enough to analyze what is happening at the boundary of the working. It is required to determine the normal and tangential displacements on its contour. Using these data and provided that the surface of the excavation is free from stress, the stress-strain state of the rock mass around the excavation and its structure are restored.

**Keywords:** stress, deformation, displacement, analysis, forecast, structure

## ***Введение***

Традиционно задачи геомеханики исследуются в трех классических постановках – когда на всех границах заданы компоненты вектора напряжений (1-я краевая задача [1-3]), когда на всех границах тела задаются компоненты вектора поворота (2-я краевая задача [4-6]), третий случай предполагает на части границ задание вектора напряжений Коши, на другой оставшейся части – вектора перемещений [7-9]. Во всех этих трех случаях при рассмотрении массива пород как протяженного геометрического тела необходимо задать так называемые условия на «бесконечности» [6, 10-12]. От них напрямую зависит ожидаемый прогноз как текущего состояния массива пород, так и будущего. Однако сделать это невозможно по простой причине – невозможно проникнуть во все удаленные точки в толще массива пород. Поэтому в каждом таком случае в расчетную схему закладываются всевозможные гипотезы от однородного распределения напряжения на «бесконечности» до линейного [6, 10-12]. Гипотезы возможно улучшать, вводить не только линейные слагаемые, но и нелинейные [13, 14]. Вместе с тем от этого произвола зависит безопасное ведение горных работ и встает вопрос о других способах прогноза, не исключая «старые» [15, 16] и в тоже время демонстрирующих существо вопроса.

В данной работе в качестве такого варианта предлагается использовать на границе два заданных вектора – вектор напряжений Коши и вектор перемещений [6, 17, 18].

В случае поверхности, свободной от напряжений, вектор напряжений Коши равен нулевому. Второй вектор – вектор перемещений определяется по пути, указанному в [19, 20].

### ***Ч1. Суть предлагаемого подхода на примере решения простейшей задачи***

Для иллюстрации подхода рассмотрим простейшую ситуацию. Пусть массив пород находится в условиях гидростатического сжатия, подчиняется при деформировании закону Гука с двумя известными заранее константами – модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$ . Требуется оценить напряженное состояние вокруг выработки в форме кругового цилиндра и условия нагружения массива пород на бесконечности.

Для этого на забое создается круговая щель [10], совпадающая по форме с контуром исходной выработки. В результате образования щели получаем два вида смещений, представленных на рис. 1.

Смещения керна в результате разгрузки будут направлены от центра круга наружу (рис. 1а). Такое поведение обуславливается разгрузкой (упругой разгрузкой для керна), чем пользуются в методах полной разгрузки [21-23]. Эти смещения характеризуют напряженно-деформированное состояние массива пород до образования выработки. Другие смещения, представленные на рис. 1б (контура «выработки») будут направлены к центру. Они характеризуют смещения массива пород в нагруженном состоянии в результате образования выработки или

образования скважины (скважинные методы измерений смещений разрабатывались в [25-27]).

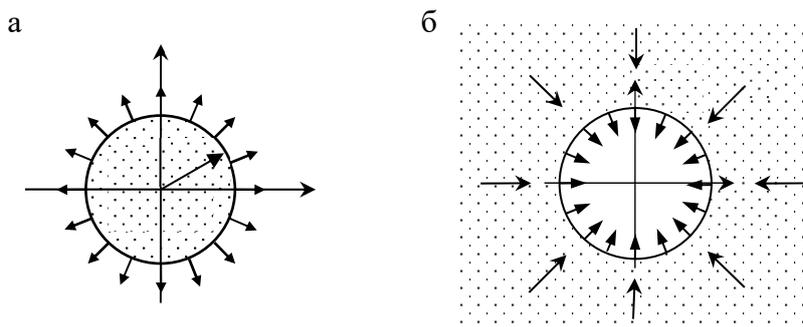


Рис. 1. Керн радиуса  $a$  (а) и массив пород с круговым отверстием (б). При снятии напряжений точки границы керна и отверстия получают смещения, направленные в противоположные стороны

Пусть они каким-либо образом измерены. Обозначим первые смещения как  $u_{0,1}$ , вторые как  $u_{0,2}$ . Таким образом на границе круга  $r = a$  имеем следующие краевые условия.

$$\begin{aligned} u_r &= +u_{0,1}, \quad u_\theta = 0; \\ u_r &= -u_{0,2}, \quad u_\theta = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Полные смещения контура «выработки» в случае, когда они уже прошли есть сумма смещений

$$u_r|_{r=a} = -u_{0,2} - u_{0,1}, \quad u_\theta|_{r=a} = 0. \quad (2)$$

Из (2) следует, что скважинные методы определения смещений не позволяют находить полные смещения контура выработки с момента ненагруженного состояния массива пород.

### **Ч2. Общий случай определения напряжений и смещений в массиве с цилиндрической выработкой с контуром $r = a$ , свободным от напряжений**

Представим себе следующую ситуацию. Пусть имеется контур цилиндрической выработки, на котором известны следующие величины:

$$\sigma_r = 0, \quad \tau_{r\theta} = 0, \quad u_r = u_r(\theta), \quad u_\theta = u_\theta(\theta). \quad (3)$$

Т.е. на контуре  $r = a$  заданы одновременно вектор напряжений Коши и вектор смещений. Не останавливаясь на способе получения решения этой задачи [28], приведем его для случая разложений смещений  $u_r, u_\theta$  вида [6]

$$u_r = A + B \cos 2\theta, \quad u_\theta = C \sin 2\theta. \quad (4)$$

Приведем следующие формулы для вычисления напряжений и смещений в полярной системе координат:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = \frac{4\mu}{\aleph+1} \left\{ \alpha \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left[ \frac{3\beta}{2} \left( 1 - \frac{a^4}{r^4} \right) + \frac{\gamma}{2} \left( 1 + 3\frac{a^4}{r^4} - 4\frac{a^2}{r^2} \right) \right] \cos 2\vartheta \right\}, \\ \sigma_\vartheta = \frac{4\mu}{\aleph+1} \left\{ \alpha \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + \left[ 3\beta \left( 2\frac{r^2}{a^2} - \frac{1}{2} + 4\frac{a^4}{r^4} \right) - \gamma \left( \frac{1}{2} + \frac{3a^4}{2r^4} \right) \right] \cos 2\vartheta \right\}, \\ \tau_{\rho\vartheta} = \frac{4\mu}{\aleph+1} \left\{ \frac{3\beta}{2} \left( 2\frac{r^2}{a^2} - 1 - \frac{a^4}{r^4} \right) + \frac{\gamma}{2} \left( 3\frac{a^4}{r^4} - 2\frac{a^2}{r^2} - 1 \right) \right\} \sin 2\vartheta, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_\rho = \frac{r}{\aleph+1} \left\{ \alpha \left( \aleph - 1 + 2\frac{a^2}{r^2} \right) + \left[ \beta \left( \aleph \frac{r^2}{a^2} - 3\frac{r^2}{a^2} + 3 + \frac{a^4}{r^4} \right) + \gamma \left( \aleph \frac{a^2}{r^2} + \frac{a^2}{r^2} + 1 - \frac{a^4}{r^4} \right) \right] \cos 2\vartheta \right\}, \\ u_\vartheta = \frac{r}{\aleph+1} \left\{ \beta \left( \aleph \frac{r^2}{a^2} + 3\frac{r^2}{a^2} - 3 + \frac{a^4}{r^4} \right) + \gamma \left( -\aleph \frac{a^2}{r^2} + \frac{a^2}{r^2} - 1 - \frac{a^4}{r^4} \right) \right\} \sin 2\vartheta, \end{cases} \quad (6)$$

здесь  $\rho = r/a$ ,  $\vartheta = \theta$ .

В прямоугольной системе координат напряжения и смещения выражаются как:

$$\begin{cases} \sigma_x + \sigma_y = \frac{8\mu}{\aleph+1} \left[ \alpha + 3\beta(x^2 - y^2) - \gamma \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} \right], \\ \sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} = \frac{8\mu}{\aleph+1} \left[ \alpha \frac{(x^2 - y^2 - 2ixy)^2}{(x^2 + y^2)^2} - \frac{3\beta + \gamma}{2} + 3\beta(x^2 + y^2) + \right. \\ \left. + \frac{(x^2 - y^2 - 2ixy)^2}{(x^2 + y^2)^4} \left( \gamma(x^2 + y^2) + \frac{3(\beta - \gamma)}{2} \right) \right]. \end{cases} \quad (7)$$

$$u_\rho + iu_\vartheta = A + \frac{B+C}{2} e^{2i\vartheta} + \frac{B-C}{2} e^{-2i\vartheta}, \quad (8)$$

$$u_x + iu_y = e^\theta (u_\rho + iu_\vartheta).$$

Коэффициенты  $\alpha, \beta, \gamma$ , входящие в (5) - (7), связаны с  $A, B, C$  соотношениями

$$\alpha = \frac{A}{a}, \quad \beta = \frac{B+C}{2a}, \quad \gamma = \frac{B-C}{2a}. \quad (9)$$

Соотношения (5) - (9) публикуются впервые.

### **ЧЗ. Расчет НДС образца из резины в виде прямоугольника с цилиндрическим отверстием при растяжении**

Речь идет о двух видах испытаний образца из тонкостенной резины в виде прямоугольника с образованием в нем кругового отверстия до растяжения и образованием отверстия в растянутом состоянии. Технология испытаний и замеров смещений контура образуемого отверстия в нерастянутом и растянутом состоянии приведена на рис. 2, 3

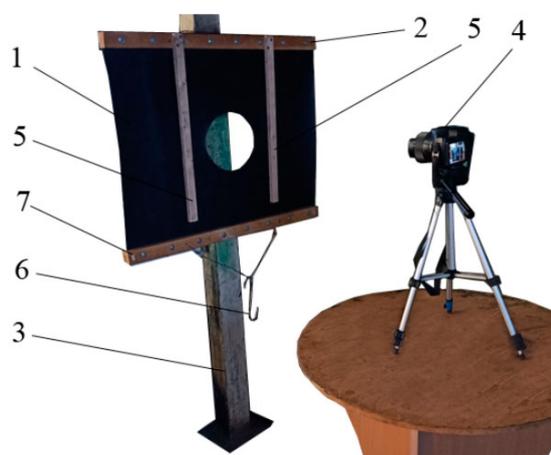


Рис. 2. Стенд: 1 – лист резины; 2 – верхняя крепежная рейка; 3 – неподвижная опора; 4 – цифровой фотоаппарат; 5 – фиксирующие планки; 6 – крюк; 7 – нижняя крепежная рейка

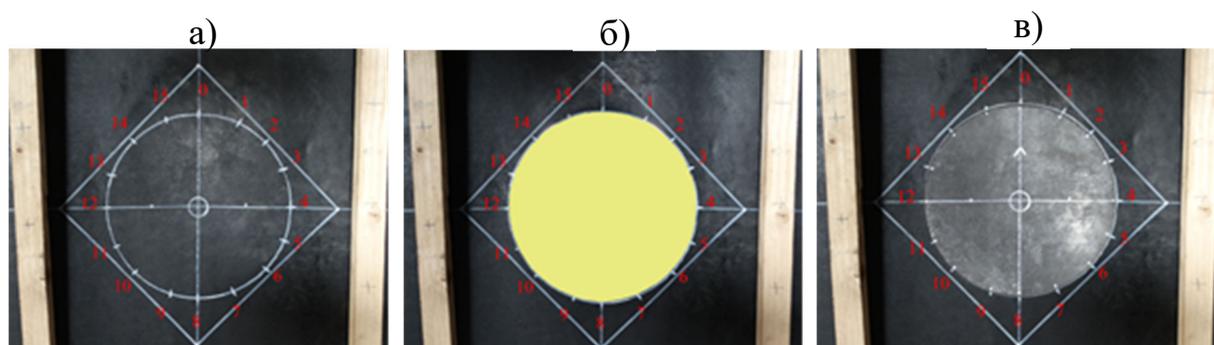


Рис. 3. Образец: (а) в нагруженном состоянии и последующим нанесением на него контура окружности, (б) в нагруженном состоянии и с вырезанным отверстием, (в) вырезанная окружность в свободном состоянии

В качестве материала, на котором определялись смещения, использовался лист резины толщиной 1 мм, имеющего ширину 800 мм и длину 680 мм с модулем упругости  $E = 10,834$  МПа, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,5$ . Масса груза равнялась 10,6 кг ( $F=106$  Н).

В результате измерений контура образуемого отверстия в нагруженном состоянии листа резины получены следующие значения параметров  $A, B, C$ , входящих в (4) - (9).

$$A = 1,4 \text{ мм}, B = -3,429 \text{ мм}, C = 3,417 \text{ мм}, C \approx -B.$$

Подставим эти данные в расчетные формулы (7). На рис. 4 приведены эпюры изменений напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  в зависимости от безразмерных параметров  $x_{\_} = x/a, y_{\_} = y/a$ .

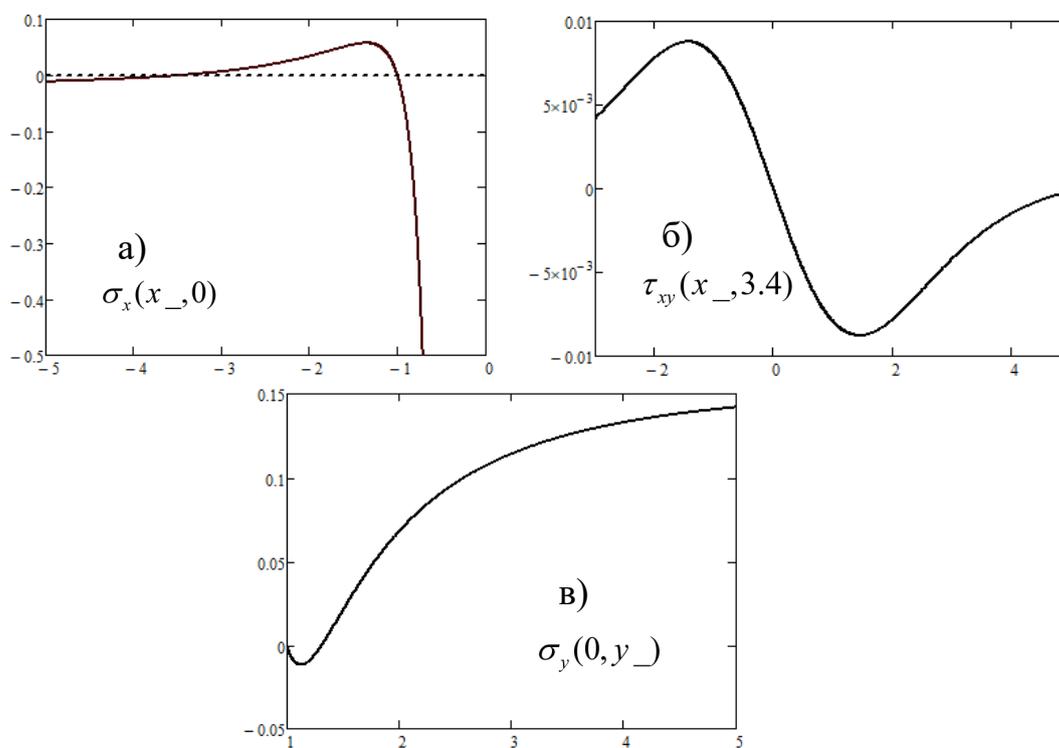


Рис. 4. Эпюры изменений напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  в зависимости от безразмерных параметров  $x_{\_} = x/a, y_{\_} = y/a$

Из рис. 4а следует, что напряжения  $\sigma_x$  при движении вдоль оси абсцисс становится равным нулю дважды при  $x_{\_} = 1$ , что соответствует контуру окружности. И второй раз при  $x_{\_} = 3,4$ . Эта точка соответствует правой границе резинового листа. На рис. 4б приведена зависимость  $\tau_{xy}$  вдоль ординаты  $x_{\_} = 3,4$ . Видно, что это напряжение колеблется в пределах значений  $4 \cdot 10^{-3}$ , что свидетель-

ствует о том, что прямая  $x_{\perp} = 3,4$  является границей, свободной от напряжений. Другой вывод касается зависимости  $\sigma_y(y_{\perp})$ . Рис. 4в показывает, что эта зависимость стремится к горизонтальной асимптоте.  $\sigma_y = 0,15$  МПа. В эксперименте прикладывалась нагрузка равная 0,1325 МПа. Как видно, различие – небольшое.

### **Заключение**

Предложен математический аппарат для оценки НДС массива пород вокруг выработки с заданными на ее контуре смещениями.

Дано сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными. Получено удовлетворительное согласие.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-17-00188.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Сенашов С. И., Савостьянова И. Л. Законы сохранения и решения первой краевой задачи для уравнений двумерной теории упругости // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2022. – Т. 23. – №. 3. – С. 417-422.
2. Еремеев В. А. Об эллиптичности уравнений равновесия градиентной теории упругости и устойчивости в малом // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 99-108. – DOI 10.21638/spbu01.2023.109.
3. Хлуднев А. М. Задачи теории упругости в негладких областях. – Москва: Физматлит, 2010. – 251 с.
4. Бородачев Н. М., Астанин В. В. Об одном методе решения пространственной задачи теории упругости в перемещениях // Проблемы прочности. – 2003.
5. Стружанов В. В. Интегро-дифференциальные уравнения второй краевой задачи линейной теории упругости. Сообщение 2. Неоднородное анизотропное тело // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 199-208. – DOI 10.14498/vsgtu1730.
6. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости: Основные уравнения: Плоская теория упругости: Кручение и изгиб. – Москва: АН СССР, 1966. 708 с.
7. Лубышев Ф. В., Файрузов М. Э. Аппроксимация смешанной краевой задачи // Журнал Средневолжского математического общества. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 429-438. – DOI 10.15507/2079-6900.20.201804.429-438.
8. Коваль К. А. Смешанные краевые задачи линейной теории упругости // Таврический вестник информатики и математики. – 2019. – № 3(44). – С. 82-97.
9. Геворкян Р. С. Асимптотические решения первой и смешанной краевых задач теории упругости для ортотропных тонких полос конечных размеров // International Scientific and Practical Conference World science. – 2017. – Т. 2, № 3(19). – С. 4-15.
10. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. – М.: недра. – 1989. – Т. 273.
11. Савин Г. Н. Концентрация напряжений около отверстий. – Москва; Ленинград: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1951. – 496 с.
12. Протосеня А. Г., Огородников Ю. Н., Деменков П. А. Механика подземных сооружений: пространственные модели и мониторинг. – Санкт-Петербург: СПбГУ: МАНЭБ, 2011. – 355 с.
13. Остросаблин Н. И. Плоское упругопластическое распределение напряжений около круговых отверстий. – Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1984. – 113 с.

14. Мирсалимов В. М., Калантарлы Н. М. Решение упругопластической задачи для массива, ослабленного круговой выработкой при действии тектонических и гравитационных сил // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2021. – №1. – С. 207-216.
15. He J., Dou L., Gong S., Li J., & Ma Z. Rock burst assessment and prediction by dynamic and static stress analysis based on micro-seismic monitoring // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2017. – Т. 93. – С. 46-53.
16. Cai W., Dou L., Zhang M., Cao W., Shi J. Q., & Feng L. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2018. – Т. 80. – С. 232-245.
17. Лурье А. И. Теория упругости. – 1970. – 939 с.
18. Новожилов В. В. Теория упругости – СПб.: Политехника, 2012. – 409 с
19. Феклистов Ю.Г. Деформационный способ комплексного определения напряженного состояния и упругих характеристик горных и строительных объектов // Проблемы недропользования. 2017. №4 (15). С 28-32. DOI:10.18454/2313-1586.2017.04.028.
20. Чанышев А. И., Плохих В. В., Городилов Л. В., Абдулин И. М., Чещин Д. О. Способ определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Патент РФ 2812358, 30.01.2024 Бюл. № 4
21. Хаст Н., Нильсон Т. Измерение напряжений в скальных породах и их значение для строительства плотин // Проблемы инженерной геологии. – Вып. 4. – М.: Мир, 1967. – С. 94 – 105.
22. Влох Н. П., Зубков А. В., Феклистов Ю. Г. Совершенствование метода целевой разгрузки // Диагностика напряженного состояния породных массивов: Сборник научных трудов. – 1980. – С. 30 – 35.
23. Leeman E. R. The measurement of stress in rock: a review of recent developments (and a bibliography) // Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, Lab. Nac. de Eng. Civil. Lisbon. 1971. p. 200–229.
24. Кузнецов С. В., Савостьянов Е. В. Способ измерения механических напряжений в массиве горных пород // Патент РФ 846730, 15.07.1981 Бюл. № 26.
25. Ljunggren C. An overview of rock stress measurement methods // Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. – 2003. – V. 40. – p. 975-989.
26. Курленя М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. – Новосибирск: Наука, 1999. – 219 с.
27. Курленя М. В., Попов С. Н. Теоретические основы определения напряжений в горных породах. – Наука. Сиб. отд-ние, 1983.
- 28 Шваб А. А. Некорректные статические задачи теории упругости // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 6. С. 98-106.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, Л. В. Городилов,  
О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко, 2024

*А. И. Чанышев<sup>1,2\*</sup>, О. Е. Белоусова<sup>1</sup>, О. А. Лукьяшко<sup>1</sup>*

## **О выборе вида сопротивления среды внедрению и об эффективности внедряемого инструмента**

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет экономики и управления, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

**Аннотация.** При проникании инструмента в среду возникают два вопроса: как оценить сопротивление среды и другой вопрос - чем один инструмент эффективнее другого. Предлагается два варианта описания сопротивления среды, из которых более реалистичным считается тот, при котором работа на преодоление сопротивления среды будет наименьшей. Для данного выбора зависимости сопротивления материала от глубины проникания предпочтительнее представляется тот инструмент, для которого работа по преодолению сил сопротивления будет также наименьшей.

**Ключевые слова:** сопротивление среды, критерии выбора зависимости сопротивления, энергетическое тождество, ряды, оценка эффективности внедрения инструмента

*A. I. Chanyshev<sup>1,2\*</sup>, O. E. Belousova<sup>1</sup>, O.A. Lukyashko<sup>1</sup>*

## **About medium resistance to penetration and the effectiveness of the penetrating tool**

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University of Economics and Management, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

**Annotation.** Two questions arise when the tool penetrates into the rock: how to evaluate the resistance of the medium and, what makes one tool more effective than the other? The resistance may be assessed in two ways, but more realistic is the one at which the work to overcome the resistance is minimal. For the given choice of the dependence of the material resistance on the penetration depth, it seems preferable to use the tool for which the work to overcome the resistance forces will also be the least.

**Keywords:** resistance of the medium, criteria for choosing the dependence of resistance, energy identity, series, evaluation of the effectiveness of penetration

### ***Введение***

В механике основным уравнением является уравнение движения Ньютона:

$$m\ddot{x} = F - R,$$

где  $F$  - активная сила,  $R$  - сопротивление движению. Его особенностью является то, что имеется сопротивление  $R$ , которое во многих случаях является величи-

ной неизвестной, подлежащей определению. В отличие от  $R$  величину  $F$  возможно измерять с помощью различных измерительных устройств таких, как динамометр, манометр и т.д. Про величину  $R$  возможно сказать то, что в общем случае она может являться функцией трех переменных:  $x, \dot{x}, t$ , что следует из записи уравнения Ньютона. При этом зависимость, например,  $R = R(t)$  определяет изменение сопротивления  $R$  с ростом времени  $t$ , что соответствует «старению» материала. Если сопротивление  $R$  зависит только от координаты  $x$ , характеризующей смещение одной части материала относительно другой, то это приводит к зависимости  $R$  от деформации. Другой вид зависимости  $R = R(\dot{x})$  означает, что сопротивление среды является функцией скорости  $\dot{x}$  (скорости проникания тела во внедряемую среду). Такой вид зависимости  $R$  от  $\dot{x}$  представлен в [1-5]

$$R = B_0 + B_1\dot{x} + B_2\dot{x}^2,$$

где коэффициенты  $B_0, B_1, B_2$  разложения  $R$  по степеням  $\dot{x}$  находятся с помощью экспериментальных данных.

Отметим, что в эту формулу не вошла глубина погружения  $x$ , хотя с точки зрения внедрения инструмента, например, в массив горных пород, сопротивление среды в большей степени зависит от глубины проникания (чем инструмент глубже внедрился в породу, тем сопротивление будет больше).

Можно отметить ряд особенностей уравнения движения Ньютона. Первая особенность заключается в том, что сила  $R$  может совпасть по величине с силой  $F$ , которую возможно измерять. Первый случай, когда  $\ddot{x} = 0$ . Тогда следует, что  $\dot{x} = C_1$ , где  $C_1$  - константа и  $x = C_1t + C_2$ . Последнее условие означает, что тело движется равномерно и прямолинейно. Нагружение с условием  $\ddot{x} = 0$  называется жестким [6-12]. Для его реализации требуется управлять изменением силы  $F$  в уравнении движения Ньютона так, чтобы сохранялось движение по прямой линии  $x = C_1t + C_2$ , то есть на каждом шаге по догружению в смещениях необходимо либо добавлять или уменьшать силу  $F$  с помощью специальных устройств (сервоклапанов) [13]. При этом приближенно будет выполняться условие  $R = F$ , которое означает измеримость сопротивления среды  $R$ .

Другой важный момент, при котором  $R = F$ , является условием равенства нулю массы в уравнении движения Ньютона. Оно достигается на контакте двух тел, при котором толщина контактного слоя является величиной бесконечно малой. Равенство  $R = F$  в этом случае выражает собой третий закон Ньютона («сила действия равна силе противодействия»).

Ниже ставится проблема о выборе функциональной зависимости сопротивления среды при внедрении в нее жесткого инструмента в виде цилиндрического тела с оголовником. Другой вопрос состоит в том, какому инструменту, с каким наконечником следует отдать предпочтение при сделанном выборе зависимости сопротивления среды от входных параметров.

## *Выбор функциональной зависимости сопротивления среды от входных параметров*

Рассматривается следующая упрощенная математическая модель сопротивления среды внедрению. Пусть имеется внедряемое тело с массой  $m$ , которое при соударении с преградой имело начальную скорость  $v_0$ . Тело падает вертикально вниз, его положение характеризуется глубиной погружения  $x$ . Введем следующие два вида сопротивления среды. В первом случае сопротивление  $R$  изменяется по правилу:

$$R_1 = a + bx^2. \quad (1)$$

Во втором случае сопротивление  $R$  изменяется как

$$R_2 = c + d\sqrt{x}, \quad (2)$$

где  $a, b, c, d$  - константы, подлежащие определению. Эти функции различны, хотя бы потому, что имеют различные направления выпуклостей. Функция (1) обращена выпуклостью вниз, функция (2) – вверх. В эти функции входят неизвестные априори параметры  $a, b, c, d$ , которые устанавливаются с помощью экспериментальных данных. Приведем уравнения для их определения.

Начальные данные предполагаются следующими:

$$x|_{t=0} = 0, \quad \dot{x}|_{t=0} = v_0. \quad (3)$$

Кроме этого считаем, что известны время до остановки инструмента в среде  $t_k$  и глубина его погружения до остановки (обозначаем как  $x_k$ ):

$$x|_{t=t_k} = x_k, \quad \dot{x}|_{t=t_k} = 0. \quad (4)$$

Требуется, исходя из этих данных, найти величины  $a, b, c, d$ , входящие в (1), (2).

Для первого случая изменения сопротивления  $R$  в виде (1) имеем уравнение движения

$$m\ddot{x} = -(a + bx^2). \quad (5)$$

Здесь  $F = 0$ ,  $R = a + bx^2$ . Умножив (5) на скорость  $\dot{x}$ , отсюда находим

$$\frac{1}{2}m \frac{d}{dt}(\dot{x}^2) = -(a + bx^2) \frac{dx}{dt}. \quad (6)$$

Сократив на  $dt$  и проинтегрировав (6), получаем

$$\frac{1}{2}m\dot{x}^2 = -\left(ax + \frac{bx^3}{3}\right) + C. \quad (7)$$

Константа интегрирования  $C = \frac{1}{2}mv_0^2$ .

С применением (7) устанавливаем, что

$$\dot{x} = v_0 \sqrt{1 - \frac{2a}{mv_0^2}x - \frac{2b}{3mv_0^2}x^3}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что в момент полной остановки инструмента  $\dot{x} = 0$  и максимальная глубина погружения определяется из уравнения

$$\frac{2}{3} \frac{b}{mv_0^2} x_k^3 + \frac{2a}{mv_0^2} x_k = 1. \quad (9)$$

Чтобы получить зависимость  $x = x(t)$ , необходимо проинтегрировать (8), то есть взять интеграл от выражения

$$\frac{dx}{\sqrt{1 - \frac{2a}{mv_0^2}x_k - \frac{2}{3} \frac{b}{mv_0^2}x_k^3}} = v_0 dt. \quad (10)$$

Аналитически этот интеграл не вычисляется, можно использовать приближенные методы.

Из (10) следует, что в подкоренном выражении (10) величина

$$\frac{2a}{mv_0^2}x + \frac{2}{3} \frac{b}{mv_0^2}x^3$$

изменяется от 0 до 1. По этой причине выражение  $1/\sqrt{1-\Delta}$  возможно разложить в ряд [14]:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\Delta}} = 1 + \frac{1}{2}\Delta + \frac{3}{8}\Delta^2 + \frac{15}{48}\Delta^3 + \dots, \quad (11)$$

где  $\Delta = \frac{2a}{mv_0^2}x + \frac{2}{3} \frac{b}{mv_0^2}x^3$ .

Из определения  $\Delta$  видно, что величины  $\Delta^2, \Delta^3, \dots$  будут иметь в знаменателе степени  $mv_0^2$  выше, чем первая. Если подаваемая кинетическая энергия за счет величины массы, значения начальной скорости есть величина достаточно большая, то тогда квадратами, кубами от  $\Delta$  возможно пренебречь, что и делается в дальнейшем.

Ограничившись в (11) двумя членами разложений и вычисляя с помощью (11) интеграл (10), находим

$$x + \frac{a}{mv_0^2}x^2 + \frac{b}{12mv_0^2}x^4 + \dots = v_0t. \quad (12)$$

Поскольку при  $t = t_k$  и  $x = x_k$ , то отсюда получаем второе уравнение для нахождения неизвестных констант разложений  $a$  и  $b$ .

Таким образом для вычислений констант  $a$  и  $b$  получаем на основе (9), (12) следующую систему из двух линейных уравнений

$$\begin{cases} a \cdot \frac{2x_k}{mv_0^2} + b \cdot \frac{2x_k^4}{mv_0^2} = 1, \\ a \cdot \frac{x_k^2}{mv_0^2} + b \cdot \frac{x_k^4}{12mv_0^2} = v_0t_k - x_k. \end{cases} \quad (13)$$

Решая (13), находим константы  $a$  и  $b$ .

Рассмотрим теперь вторую ситуацию. Пусть  $R$  изменяется по правилу (2). В этом случае вместо (5) имеем уравнение движения как

$$m\ddot{x} = -(c + d\sqrt{x}). \quad (14)$$

Умножив (14) на  $\dot{x}$ , также находим

$$\frac{1}{2}m \frac{d}{dt}(\dot{x}) = -\left(c + dx^{\frac{1}{2}}\right) \frac{dx}{dt}. \quad (15)$$

Сократив на  $dt$  и проинтегрировав (15), получаем

$$\frac{1}{2}m\dot{x}^2 = -\left(cx + 2\frac{dx^{\frac{3}{2}}}{3}\right) + C.$$

Константа интегрирования определяется начальными условиями и равна

$$C = \frac{1}{2}mv_0^2.$$

Поэтому

$$\dot{x} = v_0 \sqrt{1 - \frac{2c}{mv_0^2}x - \frac{4dx^{\frac{3}{2}}}{3mv_0^2}}. \quad (16)$$

В момент полной остановки тела  $\dot{x} = 0$ , максимальная глубина погружения определяется из уравнения

$$\frac{2c}{mv_0^2}x_k + \frac{4d}{3mv_0^2}x_k^{\frac{3}{2}} = 1.$$

Чтобы получить вторую зависимость, связывающую  $c$  и  $d$ , необходимо также проинтегрировать (16). Как и прежде имеем ситуацию, подобную (11), где

$$\Delta = \frac{2c}{mv_0^2}x + \frac{4dx^{\frac{3}{2}}}{3mv_0^2}. \quad (17)$$

В результате интегрирования выражения (11) при условии (17) находим

$$x + \frac{c}{mv_0^2}x^2 + \frac{4d}{15mv_0^2}x^{\frac{5}{2}} + \dots = v_0t.$$

Система уравнений для определения констант  $c$  и  $d$  подобна (13):

$$\begin{cases} c \cdot \frac{2x_k}{mv_0^2} + d \cdot \frac{4x_k^{\frac{3}{2}}}{3mv_0^2} = 1 \\ c \cdot \frac{x_k^2}{mv_0^2} + d \cdot \frac{4x_k^{\frac{5}{2}}}{15mv_0^2} = v_0t_k - x_k. \end{cases} \quad (18)$$

Решая (18), находим константы  $c$  и  $d$  разложения сопротивления  $R$  в виде  $R_2$ .

Дальнейший путь связан с определением площадей криволинейных трапеций, ограниченных кривыми (1), (2), ординатами  $x = 0$ ,  $x = x_k$  и осью абсцисс. В первом случае (1) соответствующий интеграл равен

$$I_1 = \left( ax + \frac{bx^3}{3} \right) \Big|_0^{x_k} = ax_k + \frac{bx_k^3}{3}, \quad (19)$$

во втором

$$I_2 = cx_k + 2d \frac{x_k^{\frac{3}{2}}}{3}. \quad (20)$$

Значения интегралов  $I_1$  и  $I_2$  сравниваются, исходя из значений констант  $a, b, c, d$ . Расчеты показывают, что наименьшее значение из  $I_1$  и  $I_2$  соответствует  $I_2$ . Приведем пример расчета. Пусть масса молота 2,5 тонны [15], скорость удара 1,5 м/с, время проникания 10 мс, глубина проникания 5 мм. Значения интеграла  $I_1 \approx 20 \text{ кДж}$ ,  $I_2 \approx 3 \text{ кДж}$ .

Поскольку в механике главенствует принцип, согласно которому на действительном движении достигается минимум затраченной энергии, то, исходя из этого принципа, из двух возможных сопротивлений среды предпочтение следует отдать тому, который соответствует минимуму затраченной работы, то есть критерию, соответствующему функции  $R_2$ .

### ***Определение эффективности внедряемого инструмента***

При ударном воздействии на массив пород часть кинетической энергии  $mv_0^2/2$  уходит на преодоление сил сопротивления среды внедрению, другая распространяется в виде волн, еще часть энергии уходит на локальные разрушения и в тепло [16-20]. Говоря об эффективности внедряемого инструмента, следует соотнести энергию, затраченную на внедрение в виде интеграла  $I_2$  ко всей приложенной энергии в виде  $mv_0^2/2$ . Это отношение можно условно назвать коэффициентом полезного действия. Чем ближе это отношение к единице, тем эффективнее внедряемый инструмент. Если взять, например, инструмент с оголовником в виде сферы и с оголовником в виде конуса, то эффективность второго инструмента будет выше потому, что за одно и то же время глубина погружения у второго инструмента будет больше. Для оценки эффективности требуется подсчитать интеграл  $I_2$  и отнести его значение к  $mv_0^2/2$ .

### ***Заключение***

Рассмотрены два возможных случая сопротивления среды при внедрении в нее жесткого инструмента в виде цилиндрического тела с оголовником. При одних и тех же входных данных определяются значения параметров, входящих

в эти определения сопротивление среды. Из двух возможных вариантов предпочтительнее считается тот при котором работа по преодолению сил сопротивления приобретает минимальное значение.

В качестве эффективности действия внедряемого инструмента предлагается критерий, связанный с отношением затрачиваемой энергии на преодоление сил сопротивления внедрению инструмента к значению подаваемой кинетической энергии.

### *Благодарности*

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 124020700085-5).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. Москва. – 1965. – 448с.
2. Баландин Вл.Вл. Установка для исследования процессов высокоскоростного соударения // Проблемы прочности и пластичности. – 2013. Т. – 75. – с. 232-237.
3. Баландин В.В., Брагов А.М., Крылов С.В., Цветкова Е.В. Экспериментально-теоретическое изучение процессов проникания сфероконических тел в песчаную преграду // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 2. С. 15–23.
4. Котов В.Л., Баландин Вл. Вл., Линник Е.Ю., Баландин Вл. В. Численный анализ методики прямого эксперимента при внедрении полусферического ударника в песчаный грунт // Проблемы прочности и пластичности. – 2022. - вып. 73. – С. 51-57.
5. Alvarez, C., Sellountou, E. A., Rausche, F. State of the Art Dynamic Load Testing of ACIP Piles in the Americas, 10th International Conference on Stress Wave Theory and Testing Methods for Deep Foundations. – ASTM 1611. – 2019, pp. 81–96.
6. Стружанов В. В., Миронов В. И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. — Екатеринбург: УрО РАН, 1995. — 192 с.
7. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. — СПб.: Наука, 2001. — 343 с.
8. Tarasov V. G. The fan mechanism as an initiator of deep-level earthquakes and rock bursts, J. Min. Sci., 2020, No. 3. — P. 18 – 23.
9. Каменских А.А., Труфанов Н.А. Численный анализ напряжённого состояния сферического контактного узла с прослойкой из антифрикционного материала // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013 (6). – № 1. – С. 54–61
10. Баранов В.Л., Иванов В.Н., Щитов В.Н. Динамика проникания жестких вращающихся инденторов в грунты. Тула. – Климовск: ТулГУ. – ЦНИИТМ – 2005. – 107с.
11. Александров В.М. Введение в механику контактных взаимодействий. Москва. – 1997. – 332 с.
12. Mogi K. Experimental rock mechanics, CRC Press, 2006.
13. Гейт Н.М.П., Годель Ф., Понталлье Б. Способ и устройство для мониторинга системы приведения на основе сервоклапанов Патент на изобретение RU 2599414 С2, 10.10.2016. Заявка № 2013144739/06 от 24.02.2012.
14. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – Изд-во ФИЗМАТГИЗ. - 1963. –1100 с.
15. Мухин А.А., Чуркин А.А., Филиппов К.А., Гаврютина А.В. К вопросу о применении метода испытания свай динамической нагрузкой с использованием принципов волновой теории удара. Геотехника.– 2020. – Т. XII. – № 2. – с. 70–87.

16. Крайко А.Н., Якунина А.Н. К построению оптимальных тел в рамках моделей локального взаимодействия // Прикладная математика и механика. – 2008. –Т. 72(1). – с. 41–53
17. Чернюк В.П., Семенюк С.М. Определение оптимальной формы и угла заострения наконечника свай при погружении в грунт // Вестник Брестского государственного технического университета. –2013, –№1. – с. 65-68.
18. Баженов В.Г., Котов В.Л. Решение задач о наклонном проникании осесимметричных ударников в мягкие грунтовые среды на основе моделей локального взаимодействия // ПММ. - 2010. - Т. 74, №3. - С. 391-402.
19. Бахолдин Б.В. Энергия удара дизель-молота при погружении свай. Основания, фундаменты и подземные сооружения. – 1977. – Вып. 66, с. 40–45.
20. Rausche F. Combining static and dynamic loading test results of piles. Proceedings of the 10th International Conference on stress wave theory and testing of deep foundations, San Diego, CA, USA. – 2018. – pp. 520–541.

© А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко, 2024

*А. И. Чанышев<sup>1</sup>, Л. В. Городилов<sup>1,2</sup>, Д. В. Степанов<sup>1</sup>*

## **Определение теплового состояния породного массива от действия сосредоточенного подземного источника**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
E-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

**Аннотация.** Приведены результаты отработки методики измерения температуры на поверхности массива с внутренним сосредоточенным источником тепла на мраморном блоке. В качестве источника тепла использован тепловой элемент спирального типа, который размещали в центре блока. На верхней грани в плоскости, перпендикулярной оси источника тепла и проходящей через центр блока, сверлили два ряда отверстий диаметром 3 мм и глубиной 1,5 и 7 мм, в которых размещали датчики температуры - термопарами. Измерение осуществляли прибором “Термодат-22М5”, к которому возможно подключение до 24 каналов с термопарами.

**Ключевые слова:** методика измерения температуры, горный массив, источник тепла, тепловое поле

*A. I. Chanyshev<sup>1</sup>, L. V. Gorodilov<sup>1,2</sup>, D. V. Stepanov<sup>1</sup>, and A. I. Pershin<sup>1</sup>*

## **Determination of the thermal state of the rock mass from the action of a concentrated underground source**

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation  
E-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

**Abstract.** The results of the development of a technique for measuring temperature on the surface of a mass with an internal concentrated heat source on a marble block are presented. A spiral-type thermal element was used as a heat source, which was placed in the center of the block. Two rows of holes with a diameter of 3 mm and a depth of 1.5 and 7 mm were drilled on the upper face in a plane perpendicular to the axis of the heat source and passing through the center of the block, in which temperature sensors (thermocouples) were placed. The measurement was carried out with the “Thermodat-22M5”, to which up to 24 thermocouple terminals can be connected.

**Keywords:** temperature measurement technique, mountain range, heat source, thermal field

### ***Введение***

В горном деле существуют классы задач, в которых решающее значение имеет температура и ее распределение. К ним относятся прежде всего задачи терморазрушения, когда за счет локального нагрева происходит механическое разрушение поверхностного слоя массива пород. Другой класс задач — определение зон оттаивания или промерзания массива пород в результате климатического или иного воздействия, что важно ввиду зависимости свойств среды (прежде всего прочностных) от этих событий.

Для того чтобы знать тепловое состояние массива пород, необходимо прибегнуть к решению уравнения теплопроводности [1–3]. Если геометрия всей области определена, известны источники тепла, их интенсивность, расположение, то тогда «работают» классические постановки. Известны методы и приемы решения подобных задач, которые описаны в многочисленных учебниках, монографиях, например в [4].

Однако для решения таких задач более удобным оказывается использование не «классических» постановок, а постановок задач Коши [5]. Для экспериментальной проверки предложенного в [5] подхода необходимы измерения температуры на поверхности массива. В настоящей работе представлена методика и результаты таких измерений для случая, когда в массиве расположен внутренний сосредоточенный источник тепла.

### *Методика экспериментов, материалы*

Для проведения эксперимента в качестве материала выбран блок из природного мрамора (рис. 1) размером 1870×950×830 мм, на который наносилась разметка. В теле блока были просверлены технологические отверстия для размещения источника тепла и датчиков температуры (термопар). Характеристики блока приведены в таблице 1.

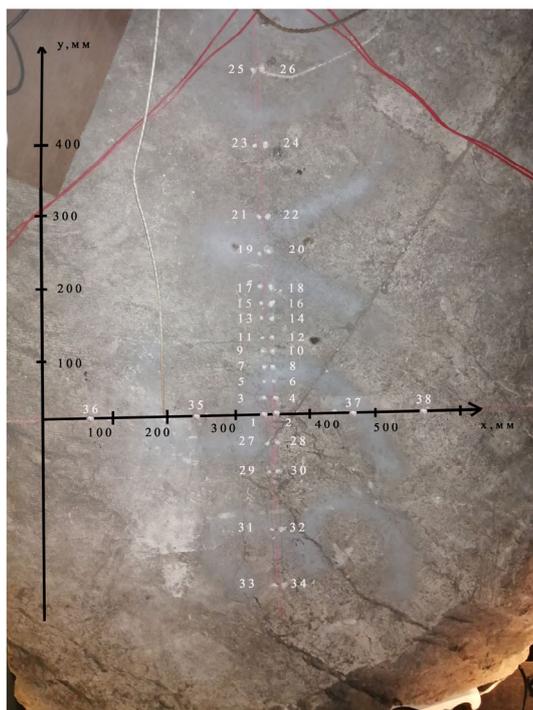


Рис. 1. Схема технологических отверстий для размещения источника тепла и датчиков температуры

Центральная ось отверстия под тепловой источник параллельна линии 36-38 и проходит на глубине 300 мм. Сосредоточенный тепловой источник имеет координату 350 мм по оси «х» и 0 по оси «у» и находится на глубине 105 мм.

Технические характеристики газобетонного блока марки «Сибит»

Характеристика	Значение”
Твердость по шкале Мооса	4
Прочность на сжатие, МПа	200
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2800
Ширина, мм	1000
Длина, мм	2000
Высота, мм	1000
Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	880
Теплопроводность, Вт/м·°С	2.9

На рис. 2 представлена фотография стенда, на котором отрабатывалась методика. В качестве источника тепла использовали тэн спирального типа мощностью 450 Вт с габаритными размерами 50x50x50 мм, который размещали в центре отверстия диаметром 52 мм и подключался к сети 220 В через лабораторный автотрансформатор, что позволяла регулировать его мощность. Отверстие для источника тепла перекрывалось заглушками цилиндрической формы из мрамора и герметизировалось асбестовым шнуром диаметром 1 мм. Измерение температуры в глубине и на поверхности блока производили с помощью прибора «Термодат-22М5», к которому возможно подключение до 24 каналов с термопарами (термопары ТД701В), сигналы от которых подавались к аналого-цифровому преобразователю и далее на персональный компьютер. Точность

При включении тэна происходил нагрев блока и выход его теплового поля в стационарный режим, после чего производили регистрацию показаний датчиков температуры.

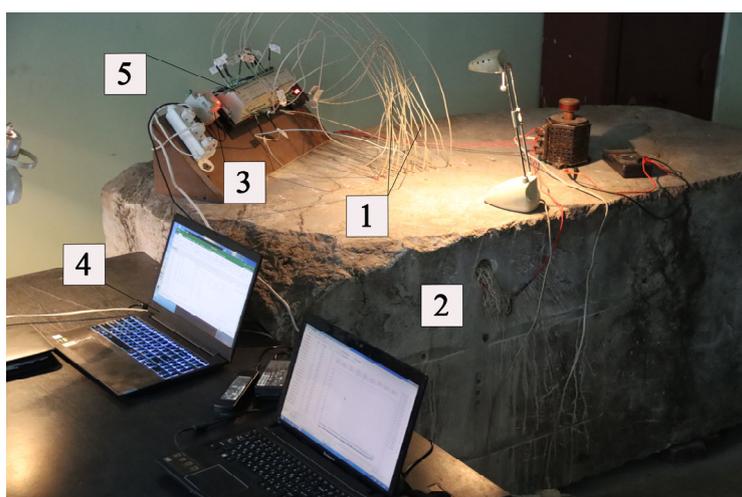


Рис. 2. Процесс измерения температуры с помощью прибора “Термодат-22М5”:  
 1 — датчики ТД701В с проводами подключения; 2 — мраморный блок; 3 — аналого-цифровой преобразователь; 4 — персональный компьютер; 5 — прибор “Термодат-22М5”

Для обеспечения тождественности показаний датчиков-термопар была проведена корректировка их характеристик по двум опорным точкам. За первую точку взята температура тающего льда (датчики помещали в емкость с тающим льдом), за вторую - температура окружающей среды. По результатам измерений с помощью программного обеспечения прибора «Термодат-22М5» вручную вносились корректирующие коэффициенты для каждого датчика, что позволяло обеспечить идентичность измерений.

### *Результаты опытов, их обсуждение*

Стационарным режимом считали состояние теплового поля блока, при котором показания датчиков температуры в течении 0.5 часа изменялись не более чем на 1.5 градуса. При заданной схеме эксперимента и тепловом источнике время достижения стационарного теплового режима составляет не менее 5 ч.

Результаты одного из опытов по измерению температуры представлены в таблицах 2, 3: в табл. 2 представлена динамика роста температуры у источника тепла и над источником на расстоянии от поверхности 6.5 мм, в табл. 3 показания температуры в точках вблизи поверхности блока. На рис. 3 представлены графики измерений температуры на поверхности блока.

*ТАБЛИЦА 2*

Результаты измерений температуры до вхождения в стационарный тепловой режим

Время, мин	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Температура у источника, град.	19.1	123.4	138.2	143.6	146.8	147.0	149.4	151.0	152.7	153.9	153.7
Температура при за- глублении на 7 мм	19.0	30.5	34.7	37.5	39.3	41.4	42.2	43.2	44.0	44.8	45.5

*ТАБЛИЦА 3*

Результаты измерения температуры вблизи поверхности

Номер точки измерения (с заглублением 7 мм)	Температура, град	Номер точки измерения (с заглублением 1.5 мм)	Температура, град
1	45.5	2	40.1
3	43.5	4	36.2
5	39.7	6	34.3
7	35.1	8	30.4
9	31.9	10	22.6
11	27.8	12	24.0
13	25.7	14	22.1
15	24.1	16	21.3
17	22.4	18	23.2
19	19.5	20	19.1
21	18.2	22	17.2
23	15.6	24	15.0
25	15.9	26	15.0

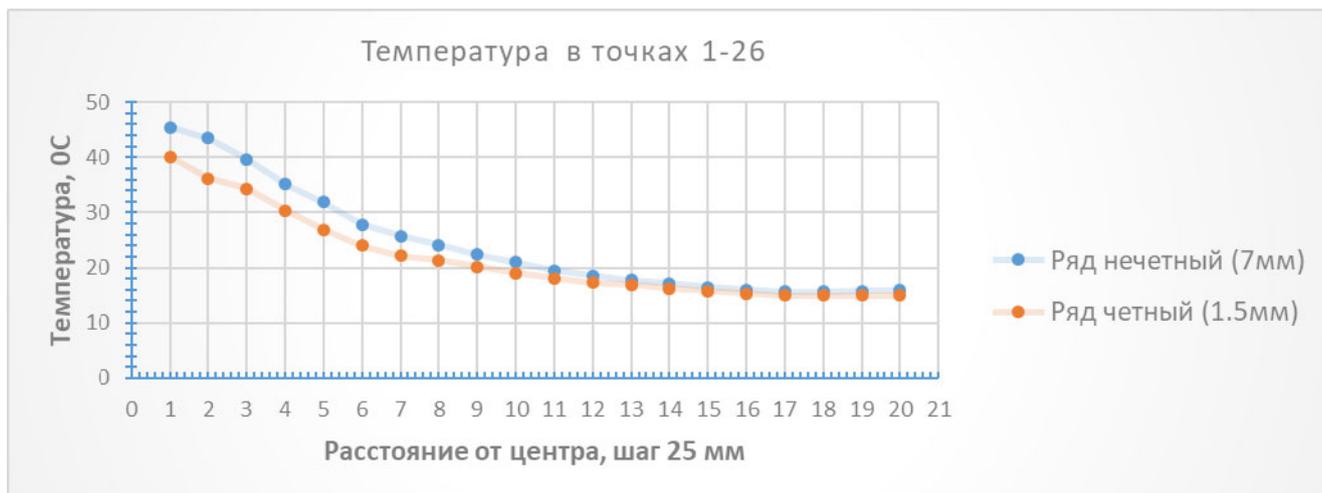


Рис. 3. Зависимости температуры в °С (по оси ординат) от расстояния до плоскости, через которую проходит ось отверстия под источник тепла на поверхности блока в см (по оси абсцисс)

### Заключение

Отработана методика измерений температуры на поверхности массива с внутренним сосредоточенным источником тепла с использованием прибора “Термодат-22М5”. Повышение надежности и точности измерений возможно при совершенствовании процедуры измерения температуры и применении термопар с более высоким классом точности.

Дальнейшее развитие исследований будет направлено на совершенствование методики и на ее сравнение с теоретическими результатами для подтверждения возможности анализа теплового поля в массиве по получаемым данным.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1977. — 799 с. [Tikhonov, A.N. and Samarsky, A. A. Equations of Mathematical Physics. — Moscow: Nauka, 1977, 799 p.]
2. Курант Р. Уравнения с частными производными. — М.: Мир, 1964. — 830 с. [Courant, R. Partial Differential Equations. — Moscow: Mir, 1964, 830 p.]
3. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1971. — 512 с. [Vladimirov, V.S. Equations of Mathematical Physics. — Moscow: Nauka, 1988, 512 p.]
4. Haberman R. Elementary applied partial differential equations, New Jersey: A Paramount Communications Company Englewood Cliffs, 1987, 568 p.
5. Chanyshv A. I. A method to determine the body thermal state // J. Min. Sci., 2012, vol. 48, no. 4, pp. 660–668.

© А. И. Чанышев, Л. В. Городилов, Д. В. Степанов, 2024

*В. В. Червов\*, А. В. Червов*

## **Температура кольцевого упругого клапана камеры холостого хода пневмомолота**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: chervov@misd.ru

**Аннотация.** Для работы пневмомолота в номинальном расчётном режиме необходимо определить и обеспечить рабочий диапазон температуры упругого клапана. Физическое моделирование и имитация условий срабатывания упругого клапана с измерением его температуры и давления в камере холостого хода осуществлялась на специально созданном для этого лабораторном стенде. Влияние температурного баланса воздуха на впуске и на выхлопе из работающего полноразмерного пневмомолота изучалось на другом стенде, в котором вёлся непрерывный контроль температуры воздуха под давлением и после выхлопа. Для измерения температуры поверхности резинового кольца производилась остановка и разборка пневмомолота с извлечением ударника.

**Ключевые слова:** пневмомолот, упругий клапан, сжатый воздух, температура, давление, стенд, энергия удара

*V. V. Chervov\*, A. V. Chervov*

## **The temperature of the annular elastic valve of the pneumatic hammer idling chamber**

Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Mining  
them. N. A. Chinakala, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\* e-mail: chervov@misd.ru

**Annotation.** To operate the pneumatic hammer in the nominal design mode, it is necessary to determine and ensure the operating temperature range of the elastic valve. Physical modeling and simulation of the operating conditions of an elastic valve with measurement of its temperature and pressure in the idle chamber was carried out on a specially designed laboratory stand. The effect of the temperature balance of air at the inlet and exhaust from a working full-size pneumatic hammer was studied at another stand, in which continuous monitoring of air temperature under pressure and after exhaust was carried out. To measure the surface temperature of the rubber ring, an air hammer was installed and disassembled with the removal of the striker.

**Keywords:** pneumatic hammer, elastic valve, compressed air, temperature, pressure, stand, impact energy

Выполнение ряда строительных работ, связанных с реализацией технологий бестраншейной прокладки стальных труб и вертикальной забивки стальных опор, производится навесным оборудованием ударного действия – большими

пневмопробойниками или пневмомолотами. Пневмопробойник работает за счёт расширения сжатого воздуха внутри камеры холостого хода, в результате которого температура понижается, что может способствовать обледенению машины [1, 2]. Минимальные зазоры ударника в корпусе при попадании льда способствуют заклиниванию и остановке пневмопробойника. Надёжную работу машины в зимних условиях обеспечивают большие зазоры и отсутствие расширения *воздуха* внутри камеры холостого хода у пневмомолота с упругим воздухо-распределительным клапаном [3, 4].

Но при работе в условиях отрицательных температур у пневмомолота тоже есть недостаток. Это время "прогрева" деформируемого резинового клапана, начальная жёсткость которого при отрицательных окружающих температурах повышенная. Жёсткое резиновое кольцо препятствует выходу пневмомолота на полный рабочий ход ударника, что снижает энергию удара. Попытка ускорить «прогрев» путём повышения давления приводит к разрушению упругого клапана.

При работе в жарком климате жёсткость материала резинового кольцевого клапана снижается – уменьшаются упругие силы, препятствующие растяжению кольца. Это приводит к нарушению функции выхлопа и ритма работы машины. Для нормальной работы машины необходимо установить рабочий диапазон температуры упругого клапана.

#### ***Стенд для определения влияния температуры материала упругого клапана на давление срабатывания (начала выхлопа).***

Температура на поверхности кольцевого упругого клапана при работе пневмомолота не может быть измерена без разборки машины. Установить влияние температуры *клапана* на давление начала выхлопа в работающем пневмомолоте не представляется возможным. Для физического моделирования срабатывания упругого клапана с регистрацией его температуры и давления в камере холостого хода был разработан и изготовлен стенд (рис. 1) [5, 6].

Движение внутренней поверхности кольцевого клапана относительно поршня в момент его срабатывания измеряется датчиком перемещения и регистрирующей аппаратурой (шлейфовым осциллографом). Температура материала клапана контролируется при помощи термопары и термометра. Давление воздуха между поршнем и наковальней измеряется датчиком давления и регистрирующей аппаратурой через усилитель *Ус* и магазин сопротивлений *М*.

Для имитации холостого хода ударника с расположенным на нём кольцевым резиновым клапаном последовательно выполняют следующие операции на стенде (рис. 1):

1. Упругий резиновый клапан предварительно нагревают в сушильном шкафу до температуры  $100^{\circ}\text{C}$  или охлаждают до  $-20^{\circ}\text{C}$  и устанавливают на поршень.

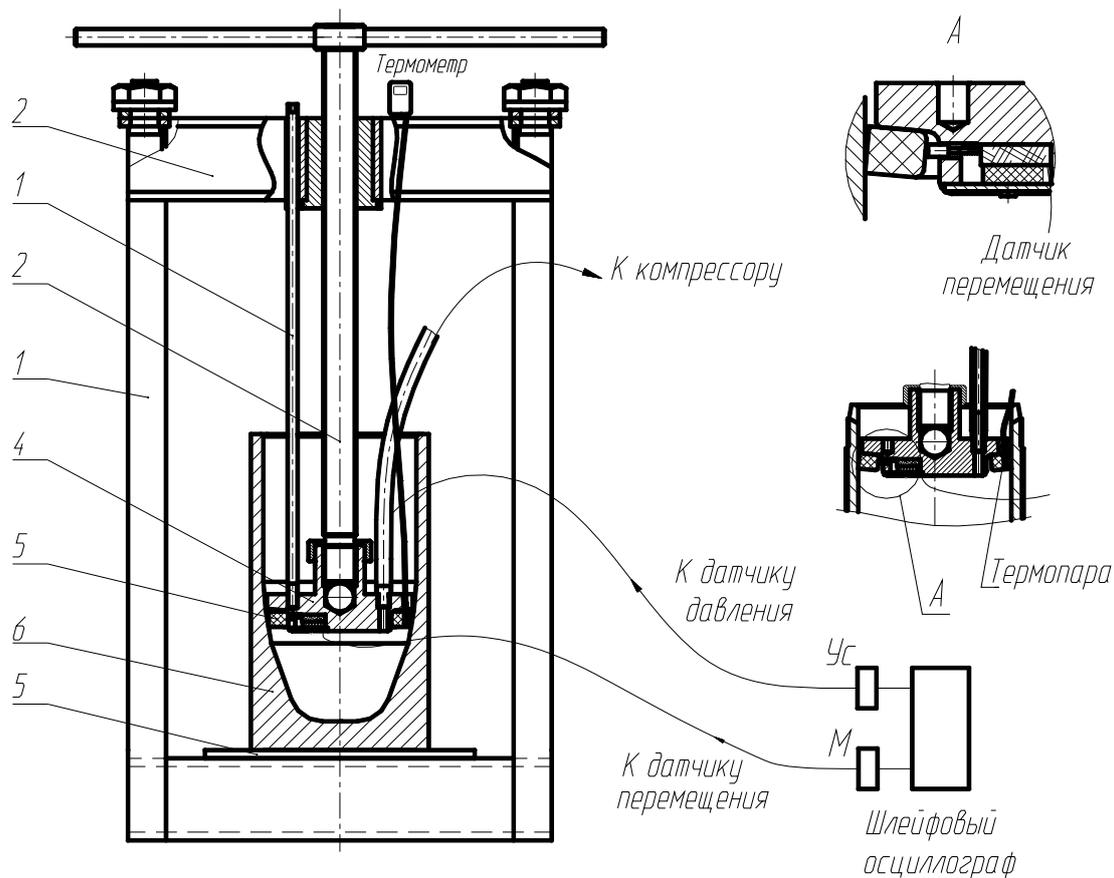


Рис. 1. Стенд для исследования упругого пневмораспределительного клапана

2. При помощи ходового винта поршень с упругим клапаном опускают в нижнее положение до касания периферийной поверхности клапана с внутренней конической поверхностью наковальни.

3. От компрессора через редуктор подают под поршень сжатый воздух до установленного по манометру давления в пределах от 0.1 до 0.3 МПа.

4. Выворачиванием ходового винта поршень с упругим клапаном поднимают в верхнее положение до выхода периферийной поверхности клапана на внутреннюю цилиндрическую поверхность наковальни.

5. При помощи редуктора постепенно уменьшают давление под поршнем до момента срабатывания и выхлопа воздуха из-под поршня.

6. Записывают температуру срабатывания клапана, которая постепенно уменьшается после нагрева или растёт после охлаждения.

7. Повторно при помощи ходового винта поршень с упругим клапаном опускают в нижнее положение до касания периферийной поверхности клапана с внутренней конической поверхностью наковальни.

8. Циклы измерений давлений и температур срабатывания с опусканием и подъёмом поршня повторяют до полного остывания после нагрева или естественного подогрева после охлаждения клапана.

По результатам экспериментов построены графики зависимости давления срабатывания от температуры для материала кольца из резиновой смеси В-14 и 3826 (рис. 2).

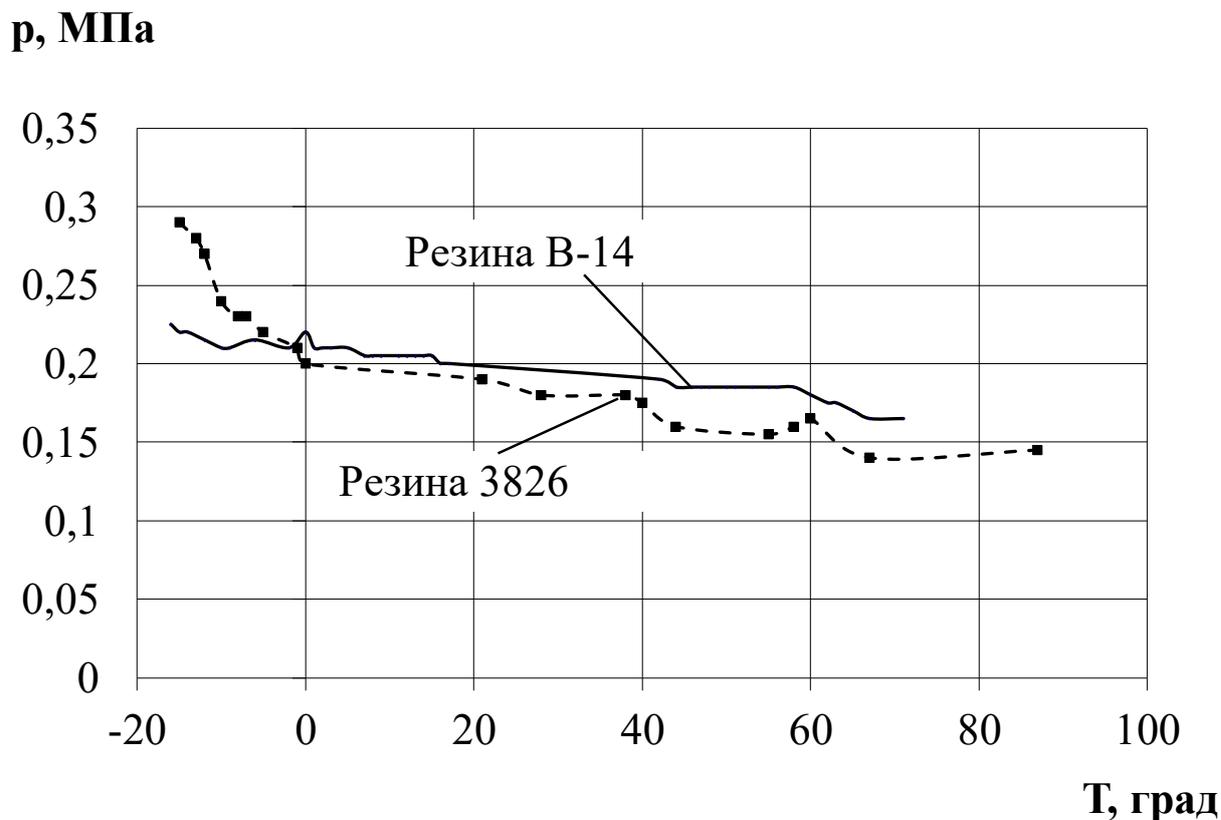


Рис. 2. Давление срабатывания упругого клапана при изменении температуры резиновой смеси 3826 и В-14.

Для упругого клапана, изготовленного из твёрдой резиновой смеси В-14, в диапазоне изменения температуры от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $70^{\circ}\text{C}$  давление срабатывания уменьшается примерно на 0,1 МПа по линейному закону

$$p = -0.00056 \cdot T + 0.21116. \quad (1)$$

При использовании резиновой смеси 3826 средней твёрдости в этом же диапазоне температуры давление срабатывания изменяется уже на 0,3 МПа и по нелинейному закону.

При положительных температурах материала резинового кольца жёсткость твёрдой резины В-14 выше, как и давление срабатывания. При отрицательной температуре жёсткость резины средней твёрдости превышает жёсткость твёрдой резины В-14. Это можно объяснить слабой морозостойкостью резины 3826. Кроме этого, детали из 3826 характеризуются присутствием гистерезиса, т.е. остаточной деформацией. Это влияет на необходимость наличия плавных переходов с одной части внутренней поверхности наковальни (с конической) на дру-

гую (на цилиндрическую) для получения дополнительного времени на восстановление периферийной поверхности упругого кольцевого клапана [7].

### **Стенд для определения температурного баланса воздуха на впуске и на выхлопе из работающего пневмомолота**

Основой стенда является коллекторное устройство в виде прижима-насадки и полости для сбора выхлопного воздуха, которые между собой соединены резиноканевыми рукавами большого диаметра 63 мм (рис. 3) [8].

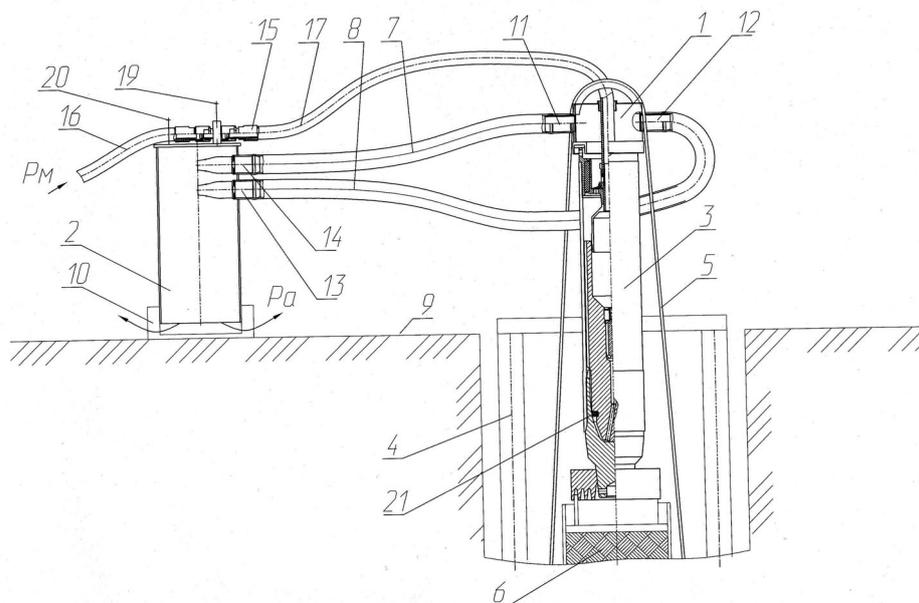


Рис. 3. Экспериментальный стенд для измерения температуры сжатого воздуха: 1 – прижим-насадка; 2 – полость для сбора выхлопа; 3 – пневмомолот с массой ударной части 80 кг; 4 – корпус стенда; 5 – устройство стяжное; 6 – энергопоглотитель; 7 и 8 – рукава; 9 – основание; 10 – поддон для масла; 11, 12, 13 и 14 – ниппель; 15 – штуцер впускной; 16 и 17 – магистральные рукава; 19 и 20 – термопары; 21 – кольцевой клапан с наружным диаметром 172 мм.

Температура потока воздуха определялась термопарами 19 и 20, которые имеют непрерывный контакт с воздухом:

- термопара 19 (№1) закреплена в отверстии впускного штуцера; конец её находится в потоке сжатого воздуха из магистрали в работающую машину;

- термопара 20 (№2) закреплена в отверстии, выполненном в стенке полости для сбора воздуха; её конец находится в потоке выхлопываемого воздуха [9].

Стабилизация показаний температуры происходит после 7–10 мин непрерывной работы пневмомолота на стенде, причём высокая частота ударов способствует более быстрой стабилизации. Разница между температурой воздуха, входящего в пневмомолот, и воздуха после выхлопа из пневмомолота составляет  $17^{\circ}\text{C}$  при малой частоте ударов в сторону её уменьшения. При наибольшей частоте ударов разница между температурами входящего в пневмомолот сжатого воздуха (0.6 МПа) и выходящего из него воздуха (0.1 МПа) уменьшается до  $10^{\circ}\text{C}$ . Другими словами, увеличение расхода воздуха (частоты ударов) способствует уменьшению разницы температур впуска и выхлопа.

## *Измерение температуры поверхности резинового кольца*

Температура на поверхности кольцевого клапана 21 и на поверхности ударника определялась при помощи пирометра Dual Laser InfraRed Thermometer DT-8861 после частичной разборки пневмомолота с извлечением ударника из его корпуса тельфером. Если резиновое кольцо предварительно нагреть до температуры 60<sup>0</sup>С и установить его в канавку на ударнике, то оно остынет до температуры 13<sup>0</sup>С в течение получаса. При этом средняя скорость остывания примерно равна 1.2 градуса в мин.

Температура резинового кольца растёт при деформации материала кольца работающего пневмомолота. Дополнительно на температуру влияет охлаждение потоком сжатого воздуха, который направляется на выхлоп в атмосферу. Наибольшая температура 25–26<sup>0</sup>С на поверхности резинового кольца наблюдается при работе пневмомолота на высокой частоте ударов (9-11 Гц) и при повышенном давлении в магистрали (1.1 МПа).

При работе пневмомолота на давлении (0.6 МПа) происходит более интенсивное охлаждение воздухом резинового кольца. Несмотря на более высокую частоту ударов (6 Гц вместо 4 Гц) температура на поверхности резинового кольца ниже (15.2<sup>0</sup>С вместо 19<sup>0</sup>С) за счёт сильной охлаждающей струи воздуха. Этот же эффект наблюдается при измерении температуры резинового кольца при проходе воздуха через неработающий пневмомолот –15.5 и 16<sup>0</sup>С.

### *Заключение*

С ростом частоты ударов степень охлаждения воздуха уменьшается, т.к. разница между температурой воздуха, входящего в пневмомолот и выходящего из него, уменьшается. Это следует учитывать при разработке новых пневмоударных машин [10 – 12]. Поэтому при эксплуатации пневмомолота в условиях отрицательных температур предпочтительно работать с более высокой частотой ударов. В жарком климате рекомендуется снижать частоту ударов пневмомолота.

Статья подготовлена при финансовом обеспечении выполнения проекта госзадания № 0256-2021-0003.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Пневмопробойники. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990. – 217с.
2. Гурков К. С., Костылев А. Д., Ткаченко Г. А. Повышение эффективности пневмопробойников // Научные основы механизации горных работ: сб. науч. тр. / ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1986. – С. 81-92.
3. Смоляницкий Б.Н., Червов В. В., Скачков К. Б. Новые пневмоударные машины Института горного дела СО РАН //Механизация строительства. – 2001 – № 12, С.7–12.
4. Червов В. В., Червов А. В. Определение условий работоспособности кольцевого упругого клапана пневмомолота с переменной структурой ударной мощности // ФТПРПИ. – 2015 – № 6. С. 72-79.
5. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: том 1 – 5-е изд. – М.: Машиностроение, 1979.
6. Гастев В. А. Краткий курс сопротивления материалов – М.: Наука, 1977.

7. Кондаков Л. А. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник. – М.: Машиностроение, 1986.
8. Червов В. В., Червов А. В. Температура сжатого воздуха и выхлопа в пневмомолоте с упругим кольцевым клапаном // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2014. № 1, Т. 2.
9. Ткач Х. Б. О работе пневматического поршневого привода с выхлопом в среду с давлением большим атмосферного // *ФТПРПИ.* – 1996 – № 6. С. 63-71.
10. Лысенко Л. Л. Выбор параметров пневмоударного механизма с клапанным воздухо-распределением // *ФТПРПИ.* – 1995 – № 2. С. 56-62.
11. Смоляницкий Б. Н. К методике расчёта пневматической машины ударного действия с одной управляемой камерой // *Горные машины: сб. науч. тр. / ИГД СО АН СССР.* – Новосибирск, 1980. – С. 37-44.
12. Русин Е. П., Юрьев Л. А. К оценке параметров рабочего цикла пневмоударных машин // *ФТПРПИ.* – 1996 – № 6. С. 83-87.

© В. В. Червов, А. В. Червов, 2024

*Е. Н. Шер*

## **Расчет паспорта прочности хрупких пород в двухмерной постановке**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: ensher@gmail.com

**Аннотация.** Расчет паспорта прочности в двухмерной постановке проводится по методу, разработанному А.А. Гриффитсом для определения напряжений, вызывающих начало разрушения твердого тела. По Гриффитсу прочность твердых тел определяется содержащимися в них трещинами и разрушение начинается, когда происходит развитие той из них, ориентация которой при заданных напряжениях вызывает ее развитие. Гриффитс рассматривал двухосное нагружение пластины, содержащей произвольно ориентированные эллиптические полости заданного размера, моделирующие критические трещины, определяющие разрушение. Напряженное состояние вокруг полости находилось из упругого решения Инглиса, которое позволяло определить максимальное растягивающее напряжение вдоль поверхности полости. Критерием разрушения служило достижение его величины критического значения. В настоящей работе в качестве модели трещины рассматривался произвольно ориентированный относительно главных осей напряжений разрез заданной длины. Особенностью новой модели является рассмотрение развития трещины при ее раскрытии и сдвиге ее берегов при смыкании. Рассмотрено взаимодействие берегов трещины при их сдвиге по закону сухого трения Кулона. Расчетами определено влияние параметров трения на границы разрушения в двухмерном поле напряжений.

**Ключевые слова:** прочность твердого тела, трещина, двухмерное поле напряжений, развитие трещины, сухое трение

*E. N. Sher*

## **Calculation of the strength passport of brittle rocks in a two-dimensional formulation**

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation  
e-mail: ensher@gmail.com

**Abstract.** Calculation of the strength passport in a two-dimensional formulation is carried out according to the method developed by A.A. Griffiths to determine the stresses that cause the onset of destruction of a solid. According to Griffiths, the strength of solids is determined by the cracks they contain, and destruction begins when the development of one of them occurs, the orientation of which at given stresses causes its development. Griffiths considered biaxial loading of a plate containing arbitrarily oriented elliptical cavities of a given size, simulating critical cracks that determine destruction. The stress state around the cavity was found from the Inglis elastic solution, which made it possible to determine the maximum tensile stress along the surface of the cavity. The criterion for destruction was the achievement of its critical value. In this work, a section of a given length, arbitrarily oriented relative to the main stress axes, was considered as a crack model. A feature of the new model is the consideration of the development of a crack during its opening and the shift of its edges

during closure. The interaction of crack faces during their shear according to Coulomb's law of dry friction is considered. Calculations determined the influence of friction parameters on fracture boundaries in a two-dimensional stress field.

**Keywords:** solid strength, crack, two-dimensional stress field, crack development, dry friction

### *Введение*

Совершенствование технологий добычи полезных ископаемых в горном деле повышает интерес к определению характеристик горных пород, связанных с их разрушением. Представительные данные об условиях разрушения породы дает ее паспорт прочности, в котором в пространстве напряжений выделены области возможного разрушения. Существует много способов определения границ таких областей. Широко применяется для этой цели при описании свойств хрупких материалов критерий разрушения Кулона – Мора. В работе [ 1] для горных пород обосновывается использование линейной огибающей кругов Мора. Интересный подход для определения условий разрушения предложил в 1924г. для двухосного напряженного состояния А.А. Гриффитс [2]. Гриффитс рассматривал двухосное нагружение пластины, содержащей произвольно ориентированные эллиптические полости заданного размера, моделирующие критические трещины, определяющие разрушение. Напряженное состояние вокруг полости находилось из решения Инглиса [3], которое позволяло определить максимальное растягивающее напряжение вдоль поверхности полости. Считается, что разрушение начинается, когда такое напряжение становится равным некоторому критическому постоянному значению. В итоге Гриффитс установил, что если  $-3\sigma_p < \sigma_1 < \sigma_2$ , то  $\sigma_2 = \sigma_p$ , если же  $\sigma_1 < -3\sigma_p$ , то разрушение происходит, когда

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 8\sigma_p(\sigma_1 + \sigma_2) = 0 \quad (1)$$

Из этого соотношения следует, что прочность при одноосном сжатии  $\sigma_c$  в 8 раз больше прочности на растяжение  $\sigma_p$ . Качественно полученный результат согласуется с данными экспериментов по разрушению горных пород и хрупких металлов, но при этом отношение  $\sigma_c/\sigma_p$  может изменяться в диапазоне от 3 до 14. Этот недостаток был частично устранен Макклинтоком и Уолшем [4], которые учли возможное смыкание берегов эллиптической полости и влияние трения при их проскальзывании. Обзор полученных результатов и сравнение с экспериментом приведены в работе [5].

В настоящей работе была сделана попытка рассчитать для хрупкой среды форму границы области разрушения в плоскости напряжений основываясь на подходе Гриффитса – рассмотрении условий роста произвольно ориентированной трещины. При этом трещина рассматривается, как тонкий разрез заданной длины  $2l$ . Предполагается, что развитие трещины в двухосном поле напряжений происходит по критерию обобщенного нормального разрыва, введенного Г.П. Черепановым [6].

### Постановка задачи

Рассматривается напряженное состояние плоскости с трещиной в виде разреза в двумерном поле внешних главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2$ , действующих вдоль осей  $x, y$ . Трещина расположена вдоль оси  $x'$  под углом  $\beta$  к оси  $x$ . Берега трещины предполагаются свободными от нагрузок. Поле внешних напряжений создает на линии разреза напряжения в локальной системе координат  $x', y'$ , связанной с трещиной:

$$\begin{aligned}\sigma'_{yy} &= \sigma_1 \sin^2 \beta + \sigma_2 \cos^2 \beta \\ \sigma'_{xy} &= (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \beta \cos \beta\end{aligned}\quad (2)$$

Принимаем, что во втором квадранте поля  $\sigma_1, \sigma_2$ :  $\sigma_2 = \sigma_y > 0, \sigma_1 = \sigma_x = -\lambda \sigma_y$

В этом случае нагрузка на верхний берег трещины в дополнительной задаче составит:

$$\begin{aligned}\sigma_n &= \sigma_y (\cos^2 \beta - \lambda \sin^2 \beta) \\ \tau_n &= \sigma_y (1 + \lambda) \sin \beta \cos \beta\end{aligned}\quad (3)$$

Отметим, что  $\sigma_n > 0$  при  $\lambda < \operatorname{ctg}^2 \beta$  или при  $\beta < \beta_0 = \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$

Соотношения (3) определяют коэффициенты интенсивности (КИИ) трещины:

$K_I = \sigma_n \sqrt{\pi l}, K_{II} = \sigma_\tau \sqrt{\pi l}$ . По критерию обобщенного нормального разрыва развитие трещины определяется по достижению критической величины  $K_{Ic}$  интенсивности максимального тангенциального растягивающего напряжения, которое определяется по формуле:

$$K_{\theta\theta}(\lambda, \beta) = \frac{K_I}{4} \cos^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) [1 + 3 \operatorname{sign}(K_I) \sqrt{1 + 8\alpha^2}] = K_{Ic} = \sigma_p \sqrt{\pi l}\quad (4)$$

Здесь  $\theta$ - угол, при котором  $\sigma_\theta$  максимально:

$$\theta = 2 \operatorname{arctg} \left[ \frac{K_I - \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{4K_{II}} \right], \quad \alpha = \frac{K_{II}}{K_I} = \frac{(1+\lambda) \sin \beta \cos \beta}{\cos^2 \beta - \lambda \sin^2 \beta}$$

По этим формулам для каждого  $\lambda$  и  $\beta$  в диапазоне  $0 < \beta < \beta_0$  рассчитывался угол  $\theta$  и по (4) находилось минимальное значение  $\bar{\sigma}_y = \sigma_y / \sigma_p$  и соответствующее ему значение  $\bar{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_p = -\lambda \sigma_y / \sigma_p$ . Данные расчетов для разных  $\lambda$  приведены в табл. 1

## Критические значения напряжений при развитие трещины разрыва

$\lambda$	0	0.5	1	2	5	10	20	40	100
$\sigma_x/\sigma_p$	0	-0.44	-0.77	-1.22	-1.95	-2.7	-3.88	-5.48	-8.7
$\sigma_y/\sigma_p$	1	0.87	0.77	0.61	0.39	0.27	0.19	0.137	0.087

Зависимость  $\bar{\sigma}_y(\bar{\sigma}_x)$ , определяющая границу области разрушения нормальным разрывом приведена на графике рис.1 кривой 1.

При  $\beta > \beta_0$  возможно развитие трещины при сдвиге сомкнувшихся берегов. В случае смыкания можно принять  $K_I = 0$ ,  $K_{II} \neq 0$ . При этом тангенциальные напряжения в вершинах трещин определяются выражением:

$$\sigma_{\vartheta\vartheta} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi s}} \left[ -3 \sin \frac{\theta}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

Максимальное значение  $\sigma_{\vartheta\vartheta}$  при  $\vartheta = \arccos\left(\frac{1}{3}\right)$  равно  $\sigma_{\vartheta\vartheta}^{max} = \frac{2K_{II}}{\sqrt{3}\sqrt{2\pi s}}$ .

Согласно критерию обобщенного нормального разрыва примем за условие развития трещины при сдвиге равенство:

$$\frac{2K_{II}}{\sqrt{3}} = K_{Ic} = \sigma_p \sqrt{\pi l}. \quad (5)$$

Значение  $K_{II}$  определяется условия взаимодействия берегов трещины при их проскальзывании. Примем, как и в работе [7], что силы такого взаимодействия определяются законом Кулона:  $f_t = k + \rho\sigma_n$ , где  $k$  и  $\rho$  – коэффициенты сцепления и трения.

Во втором квадранте плоскости  $\sigma_x, \sigma_y$  при  $\beta > \beta_0$  смещение верхнего и нижнего берегов  $u_x^+ > 0, u_x^- < 0$ , соответственно этому силы трения направлены в противоположную сторону относительно смещений:  $f_t^+ = f_t, f_t^- = f_t$ . На верхнем берегу трещины сдвигающее усилие в дополнительной задаче составит:  $\tau = \sigma'_{xy} - k - \rho\sigma_n$ . Отсюда с учетом (2), (3):

$$\tau = \sigma_y(1 + \lambda)\sin\beta\cos\beta - k + \rho\sigma_y(\cos^2\beta - \lambda\sin^2\beta).$$

Из равенства  $\frac{\partial\tau}{\partial\beta} = 0$  находим соотношение для определения угла  $\beta_*$  при котором  $\tau$  максимально:  $\operatorname{ctg}(2\beta_*) = \rho = \operatorname{tg}\gamma$ , где  $\gamma$  – угол трения. Отсюда следует:  $\beta_* = \pi/4 - \gamma/2$ ,  $\cos(2\beta_*) = \sin\gamma$ ,  $\sin(2\beta_*) = \cos\gamma$

При смыкании берегов необходимо, чтобы выполнялось неравенство  $\beta_* > \beta_0$ , из которого следует ограничение  $\lambda > \sqrt{(1 + \sin\gamma)/(1 - \sin\gamma)}$ . При выполнении этого условия

$$\tau_* = \sigma_y \frac{(1 + \lambda) + (1 - \lambda)\sin\gamma}{2\cos\gamma} - k$$

Из выражения для коэффициента интенсивности напряжений  $K_{II} = \tau_* \sqrt{\pi l}$  и критерия (5) получаем значение критического напряжения, вызывающего рост

трещины:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{\sigma_y}{\sigma_p} = \frac{\sqrt{3}\cos\gamma(1+2k/(\sqrt{3}\sigma_p))}{(1+\lambda)+(1-\lambda)\sin\gamma} \quad (6)$$

Исключая  $\lambda$  из этого соотношения и равенства  $\sigma_x = -\lambda\sigma_y$  получаем зависимость  $\bar{\sigma}_y(\bar{\sigma}_x)$ , определяющая границу области разрушения сдвигом:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{\sqrt{3}\cos\gamma}{1+\sin\gamma} + \bar{\sigma}_x \frac{(1-\sin\gamma)}{(1+\sin\gamma)} \quad (7)$$

Для случая  $k=0$  зависимости  $\bar{\sigma}_y(\bar{\sigma}_x)$  приведены на рис.1 для разных значений угла трения:  $\gamma = 0, 12^\circ, 24^\circ, 45^\circ$  прямыми 2 – 5, Для сравнения, на графике этого рисунка кривой 6 приведена граничная зависимость Гриффитса.

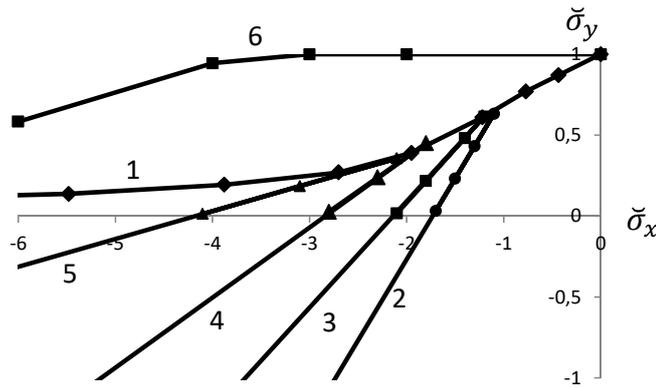


Рис.1 Границы разрушения хрупкого тела во втором и третьем квадранте плоскости главных напряжений при  $k=0$

В третьем квадранте плоскости  $\sigma_x, \sigma_y$  оба компонента главных напряжений сжимающие:  $\sigma_2 = \sigma_y < 0, \sigma_1 = \sigma_x = \lambda\sigma_y$  В этих соотношениях  $\lambda$  по сравнению с рассмотренным выше вариантом второго квадранта отличается знаком и выражение для критического напряжения получается заменой в (6)  $\lambda$  на  $-\lambda$  :

$$\bar{\sigma}_y = \frac{\sigma_y}{\sigma_p} = \frac{\sqrt{3}\cos\gamma(1+2k/\sqrt{3}\sigma_p)}{(1-\lambda)+(1+\lambda)\sin\gamma}$$

Исключая  $\lambda$  из этого соотношения и равенства  $\sigma_x = \lambda\sigma_y$ , получаем тоже соотношение (7), что и демонстрирует рис.1.

Влияние коэффициента сцепления  $k$  в законе Кулона может быть существенным при расчете сдвигового разрушения. В соответствии с (6) при  $k > 0$  точки прямой, соответствующей границе разрушения переносятся радиально пропорционально множителю  $m = (1 + \frac{2k}{\sqrt{3}\sigma_p})$ . Для примера рассчитан вариант  $\frac{k}{\sigma_p} = 1$ ,  $m \approx 2.155$ . Результат расчетов приведен на рис.2 для разных значений угла трения:  $\gamma = 0, 12^\circ, 24^\circ, 45^\circ$  прямыми 2 – 5. Кривые 6 и 7 соответствуют границе разрушения, определенные по критерию Кулона-Мора и Гриффитса. Из графиков на этом рисунке видно, что отношение  $\sigma_c/\sigma_p$  увеличилось с 4 при  $k=0$ ,  $\rho = 1$  (рис.1) до 9 при  $k=\sigma_p$ ,  $\rho = 1$

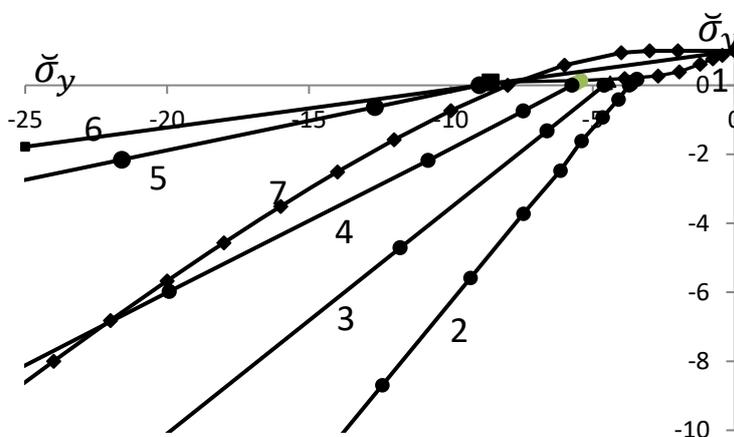


Рис. 2 Границы разрушения хрупкого тела во втором и третьем квадранте плоскости главных напряжений. Расчет проведен для случая  $k=\sigma_p$

### Обсуждение

В настоящей работе проведены в двумерной постановке расчеты формы границы области разрушения в плоскости напряжений основываясь на подходе Гриффитса – рассмотрении условий роста произвольно ориентированной трещины, моделируемой разрезом критической длины. В отличие от работы Гриффитса, в расчетах учитывалось смыкание берегов разреза в зависимости от внешнего напряженного состояния. При расчетах проскальзывания берегов трещины для определения их нагружения использовался закон Кулона. В качестве критерия роста трещины применен критерий обобщенного нормального разрыва, введенный Г.П. Черепановым.

Расчеты показали значительное отличие формы границы области разрушения в плоскости напряжений по сравнению с полученной Гриффитсом. Особенно такое отличие велико во втором квадранте плоскости нагружения, где имеются растягивающие напряжения.

## *Заключение*

Расчеты по модифицированной модели Гриффитса показали значительное отличие формы границы области разрушения в плоскости напряжений по сравнению с полученной Гриффитсом. Особенно такое отличие велико во втором квадранте плоскости нагружения, где имеются растягивающие напряжения. Кривая Гриффита здесь выпуклая, в то время, как по модифицированной теории – вогнутая. Чтобы выяснить причины такого отличия, требуются дополнительные исследования. Прямая Кулона-Мора при этом занимает промежуточное положение, близкое к прямой разрушения, определяемого сдвигом с углом трения  $\gamma = 45^\circ$ .

Положительным результатом новой модели можно считать учет параметров трения берегов трещин при проскальзывании и определение их влияния на расположение границы области разрушения в плоскости напряжений по сравнению с полученной Гриффитсом.

Отмечу, что теоретический подход по расчету паспорта прочности еще далек от завершения и определяющее влияние здесь будет иметь эксперимент.

## *Благодарности*

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования РФ (№ гос. регистрации 121062200075-4).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машуков В.И., Пирля Н.В., Барышников В.Д. Структура горной породы и ее паспорт прочности // ФТПРПИ.–1990. –№3.–С. 21–27
2. Griffiths A.A. The phenomena of rapture , Proc. 1<sup>st</sup> Int. Con. Appl. Mech. (Delft), 1924, pp.55-63
3. C.E. Inglis, "Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners," Transactions of the Institution of Naval Architects, Vol. 55, London, 1913, pp. 219–230
4. F. A. McClintock and J. B. Walsh, "Friction on Griffith Cracks in Rocks Under Pressure," Proceedings of the Fourth U. S. National Congress of Applied Mechanics, Berkeley, Calif., vol. 2, 1962, pp. 1015-1021.
5. E. Hoek and Z.T. Bieniawski Brittle Rock Fracture Propagation In Rock Under Compression// International Journal of Fracture Mechanics, 1965, - 1, №3, pp 137-155
6. Черепанов Г.П. О развитии трещин в сжатых телах // ПММ –1966.–30. Вып. 1, – С.82–93
7. Черепанов Г.П. Механика разрушения.–М. Ижевск: Институт компьютерных исследований. –2012. – 872 с

© Е. Н. Шер, 2024

*Т. В. Шилова\*, А. Н. Дробчик*

## **Исследование влияния полиуретановых составов на деформационно-прочностные свойства песков в условиях трехосного сжатия**

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: shilovatanya@yandex.ru

**Аннотация.** В работе приведены результаты экспериментальных исследований двухрастворной пропитки мелкозернистого песка высокоэластичной низковязкой полиуретановой смолой и быстродействующим полиуретановым составом, предназначенным для повышения прочности породы. Получено, что в условиях трехосного сжатия песок, пропитанный полиуретановыми смолами с суммарной объемной долей более 30 об. %, выдерживает незначительные нагрузки, образцы разрушаются неполностью и восстанавливаются до первоначального размера после снятия вертикальной нагрузки. Установлено, что использование двухрастворной пропитки полиуретановыми смолами песка приводит к повышению прочности породы в условиях трехосного сжатия при суммарном объеме составов менее 30 об. %. Добавка 5 об. % быстродействующей полиуретановой смолы повышает прочность песка, укрепленного высокоэластичной смолой, примерно в 1,5 раза. В то же время порода, пропитанная только высокоэластичным составом, выдерживает более значительные вертикальные деформации.

**Ключевые слова:** полиуретановые составы, деформационно-прочностные свойства, песок, трехосное сжатие

*T. V. Shilova\*, A. N. Drobchik*

## **Study of influence of polyurethane compositions on deformation-strength properties of sand under triaxial compression**

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation

\* e-mail: shilovatanya@yandex.ru

**Abstract.** The paper presents the results of experimental studies of two-solution impregnation of fine sand with a highly elastic, low-viscosity polyurethane resin and a fast-acting polyurethane composition designed to increase the rock strength. It was obtained that sand impregnated with polyurethane resins with a total volume more than 30 vol. %, withstands minor loads under triaxial compression conditions. The samples are not completely destroyed and are restored to their original size after removing the vertical load. It has been established that the use of two-solution impregnation of sand with polyurethane resins with a total volume of the compositions of less than 30 vol. % leads to an increase in the rock strength under conditions of triaxial compression. Additive 5 vol. % fast-acting polyurethane resin increases the strength of sand reinforced with highly elastic resin by approximately 1.5 times. At the same time, rock impregnated only with a highly elastic composition can withstand more significant vertical deformations.

**Keywords:** polyurethane compositions, deformation-strength properties, sand, triaxial compression

## *Введение*

Физико-химические методы, такие как инъекционное укрепление, пропитка и тампонирувание полимерными составами, смешивание с вяжущими материалами и др., широко используются для армирования рыхлых пород и предотвращения фильтрации флюидов в грунтовом массиве [1-4]. Преимущества и недостатки основных типов полимерных композиций рассмотрены в работах [5-8]. Лабораторные исследования свойств укрепленной породы позволяют прогнозировать эффективность работ с учетом различных факторов, рекомендовать для практического использования тот или иной способ стабилизации грунтов [9-12]. Изменение проницаемости песчаной породы при неполном насыщении высокоэластичной полиуретановой смолой изучено в работе [13]. Установлено, что при объемной доле смолы 20-40 об. %, коэффициенты проницаемости пропитанного песка соответствуют значениям практически непроницаемых пород. В то же время при избытке высокоэластичного полиуретанового состава укрепленная порода стабильна лишь при небольших нагрузках. В работе предложен способ, включающий дополнительную пропитку песка малым объемом быстродействующего полиуретанового состава для повышения прочности, приведены результаты лабораторных исследований деформационно-прочностных свойств в условиях трехосного сжатия.

## *Материалы и методы*

В экспериментах использовали двухкомпонентную, медленно-реагирующую высокоэластичную полиуретановую смолу (далее смола 1) и однокомпонентную быстродействующую полиуретановую смолу (далее смола 2). Смола 1 предназначена для консолидации и гидроизоляции грунтов, создания противofильтрационных завес и пр., образуется при смешивании до однородной консистенции двух компонентов А и Б в объемном отношении 1:1. Низкая вязкость смолы 1, сохраняющаяся на протяжении длительного времени способствует увеличению зоны пропитки рыхлых пород, снижению фильтрационных свойств и пр. В отвержденном виде смола 1 представляет собой непроницаемый, эластичный материал, стабильный при небольших деформациях. Смола 2 предназначена для укрепления рыхлых, неустойчивых пород, заполнения трещин в каменных конструкциях и др., в экспериментах использовалась для повышения прочности породы. Реакция полимеризации происходит при смешивании полиуретанового состава с водой до однородной консистенции. В экспериментах использовали соотношение объемов смолы и воды - 5:1. Время отверждения составляет около 90 секунд при температуре 25°C. Лабораторные исследования проводили с образцами мелкозернистого песка с размером основной фракции (более 90 мас. %) - 0,2 – 0,25 мм. Плотность частиц и скелета сухого грунта в среднем равны 2,64 г/см<sup>3</sup> и 1,6 г/см<sup>3</sup>, соответственно.

В экспериментах использовали однорастворный и двухрастворный способы пропитки песка составами. В способе однорастворной пропитки приготовлен-

ную смесь компонентов А и Б смолы 1 добавляли в песок и перемешивали до образования однородной массы. В случае двухрастворной пропитки песок последовательно смешивали с готовыми смолами 1 и 2. Образцы формировали при удельных расходах смолы 1 на единицу объема рыхлой породы 5, 10, 20, 40 об. %. Объемный расход смолы 2 составлял 5, 10 об.%. (см. табл. 1) Полученные смеси реагентов с песком размещали слоями, уплотняя на каждом этапе, в стальных цилиндрических формах диаметром и высотой: 50 мм и 120 мм и оставляли до полного отверждения составов. Затем образцы извлекали из форм и обрезали их на станке до высоты 100 мм.

*Таблица 1*

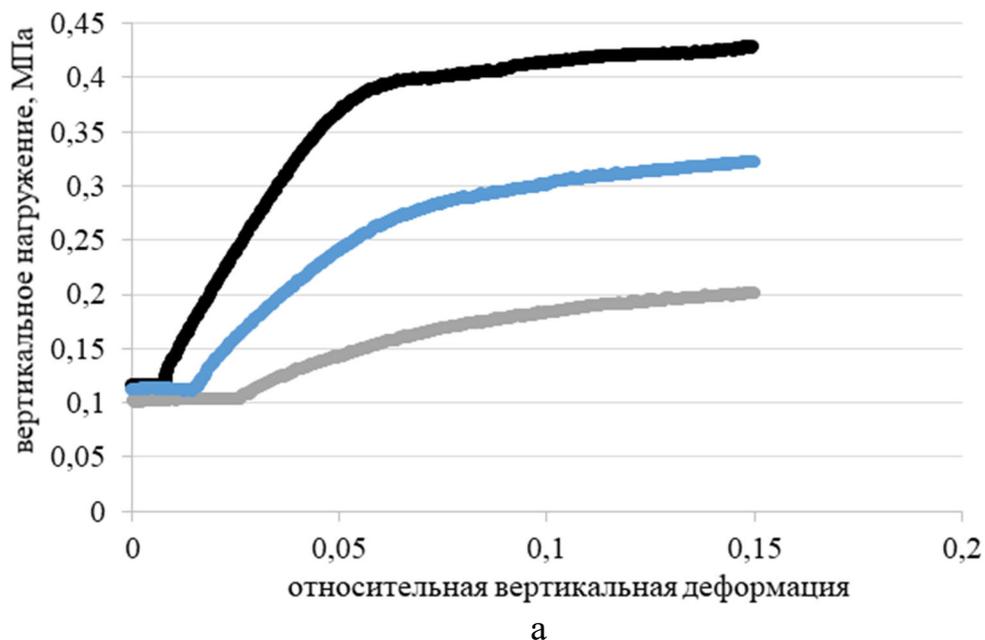
Расход полиуретановых смол для пропитки мелкозернистого песка

Тип образцов	Расход смолы 1, об. %	Расход смолы 2, об. %
1	40	0
2	20	0
3	40	10
4	40	5
5	20	10
6	20	5

Сформированные цилиндрические образцы пропитанного песка диаметром 50 мм и длиной 100 мм использовались для проведения деформационно-прочностных тестов. Испытания проводились методом осесимметричного трехосного сжатия на приборе ГТ 1.3.5. Эксперименты проводили при боковом давлении 100кПа, с шагом вертикального штока 0,5 мм и с ограничением вертикальной нагрузки 5000 кПа. По результатам тестов определяли значения вертикального нагружения и характер деформирования образцов до значения относительной вертикальной деформации образца - 15%.

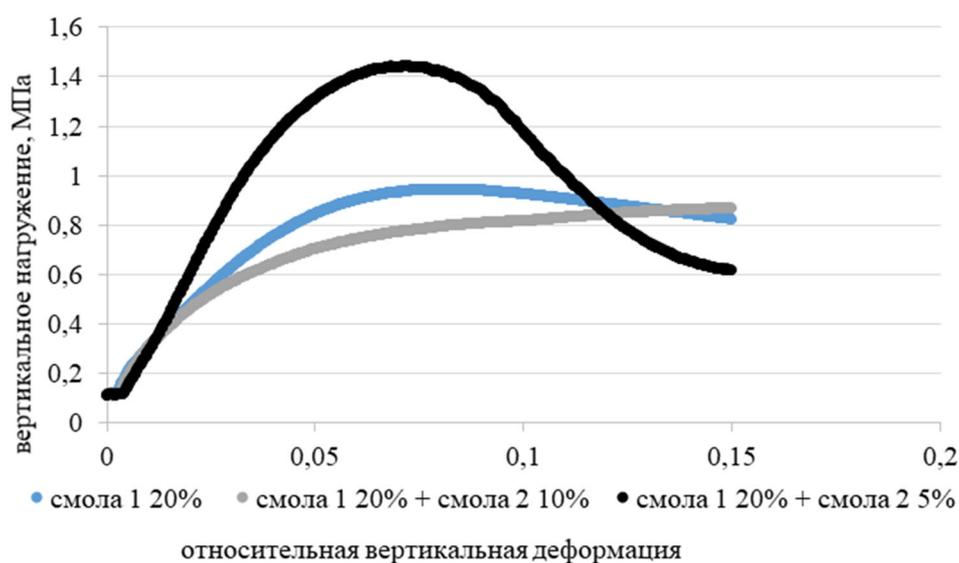
### ***Результаты***

Экспериментальные исследования показали, что образцы пропитанного песка, сформированные с объемным расходом высокоэластичной полиуретановой смолы 1 40 об. %, достигают относительную деформацию 15% при значениях вертикальной нагрузки 0,2 – 0,45 МПа. Образцы полностью не разрушаются и после снятия вертикальной нагрузки восстанавливаются до начальной высоты (рис. 1). В случае объемного расхода 20 об. % смолы 1 укрепленный песок разрушается при величине вертикальной нагрузки около 1 МПа. В случае добавки быстродействующей полиуретановой смолы 2 10 об. %, образцы достигают относительную деформацию 15%, полностью не разрушаясь, а при двукратном уменьшении объема смолы 2 до 5 об. % - разрушаются, когда вертикальная нагрузка достигает значений 1,4 – 1,5 МПа. Относительная вертикальная деформация образцов составляет 6 – 8 % (рис. 2).



б

Рис. 1. а. Диаграммы «вертикальное нагружение – деформация» образцов пропитанного песка с объемной долей высокоэластичной полиуретановой смолы 1 - 40 об. % и быстродействующей смолы 2 - 5 об. %, 10 об. %, полученные при испытаниях на трехосное сжатие. Содержание смолы 1 и смолы 2: черный цвет - 40 об. %; голубой цвет - 40 об. % и 5 об. %; серый цвет - 40 об. % и 10 об. %. б. Образец мелкозернистого песка, пропитанного полиуретановой высокоэластичной смолой 1 с объемным расходом 40 об. %: слева – до, по центру – в процессе, справа - после эксперимента на трехосное сжатие



а



б

в

Рис. 2. а. Диаграммы «вертикальное нагружение – деформация» образцов пропитанного песка с объемной долей высокоэластичной полиуретановой смолы 1 - 20 об. % и быстродействующей смолы 2 - 5 об. %, 10 об. %, полученные при испытаниях на трехосное сжатие. Содержание смолы 1 и смолы 2: черный цвет - 20 об. % и 5 об. %; голубой цвет - 20 об. % и 10 об. %; серый цвет - 20 об. %. б. Образец мелкозернистого песка, пропитанного полиуретановой смолой 1 с объемным расходом 20 об. %: слева – в процессе, справа - после эксперимента на трехосное сжатие. в. Образец мелкозернистого песка, пропитанного полиуретановыми смолами 1 и 2 с объемными долями 20 об. % и 5 об. %: слева – в процессе, справа - после эксперимента на трехосное сжатие.

## **Обсуждение**

В условиях трехосного сжатия песок, пропитанный полиуретановыми смолами с суммарной объемной долей более 30 об. %, выдерживает незначительные нагрузки, образцы разрушаются неполностью и восстанавливаются до первоначальной высоты после снятия вертикальной нагрузки. Добавка 10 об. % быстродействующей полиуретановой смолы 2 увеличивает прочность пропитанной породы. Образцы песка, укрепленного высокоэластичной полиуретановой смолой с объемной долей 20 об. %, разрушаются при вертикальной нагрузке около 1 МПа. Использование двухрастворного способа пропитки с добавкой 5 об. % смолы 2 увеличивает прочность породы примерно в 1,5 раза. В то же время установлено, что песок, пропитанный только высокоэластичной смолой 1 выдерживают более значительные вертикальные деформации.

## **Заключение**

По результатам экспериментальных исследований установлено, что использование двухрастворной пропитки полиуретановыми смолами мелкозернистого песка приводит к повышению прочности в условиях трехосного сжатия при суммарном объеме составов менее 30 об. %. Добавка 5 об. % быстродействующей полиуретановой смолы повышает прочность песка, укрепленного высокоэластичной смолой, примерно в 1,5 раза.

## **Благодарности**

Исследование выполнено в рамках госзадания (проект № 0256-2021-0001, шифр темы FWNZ-2021-0001). В работе использовано оборудование ЦКП ГГГИ СО РАН.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Jinpeng Z., Limin L., Yang L. Mechanism and experiment of self-stress grouting reinforcement for fractured rock mass of underground engineering //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2023. – Т. 131. – С. 104826.
2. Chen Z., Zhu S. S. In-situ polymerization of dicyclopentadiene for rock reinforcement //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Т. 173. – С. 912-921.
3. Климчук, И.В., Маланченко В.М. Опыт применения полимерных технологий на горнодобывающих предприятиях России // Горная промышленность. – 2007. – № 4. – С. 22–25.
4. Васильев В. В. Полимерные композиции в горном деле. – 1986.
5. Hu X., Cheng W., Wang D. Properties and applications of novel composite foam for blocking air leakage in coal mine //Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Т. 87. – №. 8. – С. 1099-1108.
6. Ortiz R. C. Mechanical behavior of grouted sands. – 2015.
7. Sabri M. M., Shashkin K. G. The mechanical properties of the expandable polyurethane resin based on its volumetric expansion nature //Magazine of Civil Engineering. – 2020. – №. 6 (98). – С. 9811.
8. Bohloli B. et al. Cements for tunnel grouting—Rheology and flow properties tested at different temperatures //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019. – Т. 91. – С. 103011.
9. Nowamooz H. Resin injection in clays with high plasticity //Comptes Rendus Mécanique. – 2016. – Т. 344. – №. 11-12. – С. 797-806.

10. Yang J. et al. Pre-grouting reinforcement of underwater karst area for shield tunneling passing through Xiangjiang River in Changsha, China //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – Т. 100. – С. 103380.

11. Liu J. et al. Study on engineering properties of sand strengthened by mixed fibers and polyurethane organic polymer //Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2020. – Т. 79. – С. 3049-3062.

12. Anagnostopoulos C. A. et al. Physical and mechanical properties of chemically grouted sand //Tunnelling and underground space technology. – 2011. – Т. 26. – №. 6. – С. 718-724.

13. Шилова Т. В., Сердюк И.М., Сердюков С.В., Иванова О.А., Сердюков А.С. Изменение проницаемости рыхлой породы при неполном насыщении высокоэластичной полимерной смолой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. - № 1. – С. 26 – 32.

© Т. В. Шилова, А. Н. Дробчик, 2024

*А. И. Чанышев<sup>1,2\*</sup>, И. М. Абдулин<sup>1</sup>, Д. О. Чещин<sup>1</sup>, В. В. Плохих<sup>1</sup>*

## **Применение щелевой разгрузки для определения смещений контура выработки**

- <sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
- <sup>2</sup> Новосибирский государственный университет экономики и управления, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

**Аннотация.** Предлагается способ определения нормальных и тангенциальных смещений контура цилиндрической выработки в случае, когда они уже прошли в момент создания выработки. Для этого в нагруженном состоянии применяется щелевая разгрузка с замером смещений контура образующегося керна и контура образующейся скважины. Полные смещения контура выработки представляют собой сумму смещений контура скважины и смещений, взятых с обратным знаком, керна. Представленная идея провести на резиноподобных материалах при их растяжении с вырезом до приложения нагрузки и с вырезом кругового отверстия в растянутом состоянии.

**Ключевые слова:** выработка, смещения, разгрузочная щель, цилиндрическая щель, напряжения, керн, контур скважины

*A. I. Chanyshev<sup>1\*</sup>, I. M. Abdulin<sup>1</sup>, D.O. Cheshchin<sup>1</sup>, V.V. Plokhikh<sup>1</sup>*

## **Application of slot unloading to determine displacements of the excavation contour**

- <sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
- <sup>2</sup> Novosibirsk State University of Economics and Management, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

**Annotation.** A method is proposed for determining the normal and tangential displacements of the contour of a cylindrical excavation in the case when they have already passed at the time of creation of the excavation. To do this, in a loaded state, slot unloading is used with measurement of displacements of the contour of the resulting core and the contour of the resulting well. The total displacements of the excavation contour are the sum of the displacements of the well contour and the displacements, taken with the opposite sign, of the core. The presented idea is carried out on rubber-like materials when they are stretched with a cutout before applying a load and with a cutout of a circular hole in the stretched state.

**Keywords:** workings, displacements, unloading slot, cylindrical slot, stresses, core, well contour

## *Введение*

Щелевая разгрузка создается для исследования нагруженного состояния керна (рис. 1а), состояния материала вокруг скважины (рис. 1б), для определения полных смещений контура выработки, когда они уже прошли в момент ее создания (рис. 1в)

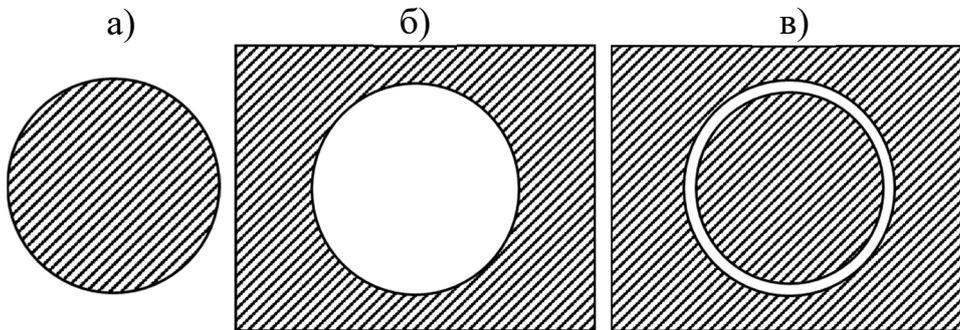


Рис. 1. Щелевая разгрузка в трех типовых ситуациях

Проведем краткий анализ представленной на рис. 1 ситуации. На нем представлена точка в массиве горных пород с окрестностью в виде керна [1-5]. Если на границе керна в момент создания разгрузочной щели измерять граничные смещения, то получим граничные условия второй краевой задачи механики деформируемого твердого тела с оценкой напряженно-деформированного состояния в окрестности данной точки. Эту ситуацию возможно использовать для проверки численных результатов с применением различных вычислительных комплексов типа ANSYS. Вторая ситуация (рис. 1б) относится к скважинным методам измерений напряжений в массиве горных пород. Отличительной особенностью скважинных методов является оценка смещений, образованных скважиной (полостью) в нагруженном состоянии массива пород. Здесь смещения – результат создания отверстия, но это еще не полные смещения контура выработки в момент ее создания (не учтены смещения за счет первоначальной нагруженности массива пород). К скважинным методам можно отнести [6-9]. Третья ситуация представлена на рис. 1в. Здесь в процессе образования разгрузочной щели измеряется как смещения образуемого керна, так и смещения контура скважины. Для получения полных смещений контура выработки необходимо к смещениям контура скважины добавить с противоположным знаком смещения контура керна [10].

Ниже приводится на примере резиноподобного материала проверка расчетной схемы.

### *Методика измерения смещений резины в нагруженном состоянии*

В основу методики положен метод фотограмметрии, в котором измерения смещений реперов на листе резины велось с помощью снимков цифрового фотоаппарата.

В качестве регистратора смещения реперов использовался фотоаппарат Sony DSC-HX300 с разрешением съемки 5184x3888 пикселей. Обработка фотографий производилась на ПК с помощью графического редактора.

Фотография стенда, на котором проведены измерения смещений, представлена на рис. 2.

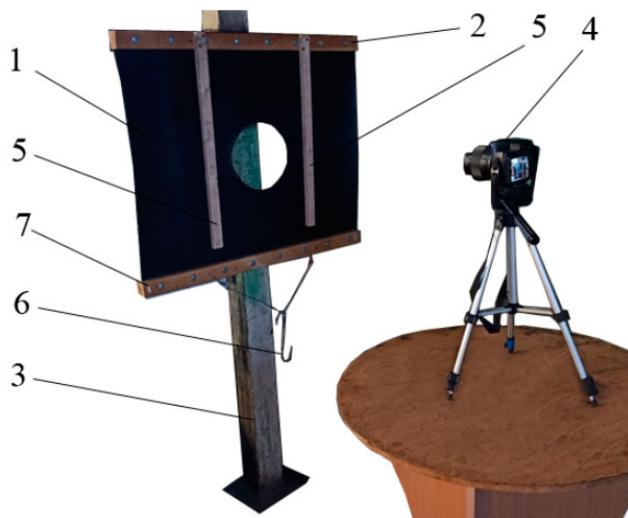


Рис. 2. Стенд: 1 – лист резины; 2 – верхняя крепежная рейка; 3 – неподвижная опора; 4 – цифровой фотоаппарат; 5 – фиксирующие планки; 6 – крюк; 7 – нижняя крепежная рейка

Стенд состоит из листа резины 1, закрепленного через верхнюю крепежную рейку 2 к неподвижной опоре 3. Фиксация смещений производилась с помощью цифрового фотоаппарата 4, установленного напротив центра листа 1. Для определения смещений резины к верхней крепежной рейке 2 были закреплены фиксирующие планки 5 с отметками на них, с целью последующего масштабирования и совмещения полученных фотографий. Подвешивание груза осуществлялось на крюк 6, который был непосредственно связан с нижней крепежной рейкой 7.

В качестве материала, на котором определялись смещения, использовался лист резины толщиной 1 мм, имеющего ширину 800 мм и длину 680 мм с модулем упругости  $E = 10,834$  МПа, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,5$ . Масса груза равнялась 10,6 кг ( $F=106$  Н).

### *Эксперимент. Часть 1*

Первоначально на листе производилась разметка с целью определения центральной точки и размечался контур вырезаемой части. Далее происходило установка листа резины на стенд и фотофиксация контрольных точек (рис. 3а). На следующем этапе происходило подвешивание на лист груза и повторная фотофиксация (рис. 3б). После этого происходило вырезание намеченного контура и фотофиксация под нагрузкой (рис. 3в).



Рис. 3. Образец с нанесенным контуром окружности: (а) в свободном состоянии, (б) в нагруженном состоянии, (в) с вырезанным отверстием и в нагруженном состоянии

Для определения величин смещений был рассчитан масштабный коэффициент преобразования:

$$k_p = \frac{H_m}{H_p},$$

где  $H_m$  – натурное расстояние отрезка на фотографии, мм;  $H_p$  – количество пикселей в этом отрезке на фотографии, пиксель. Таким образом получаем:

$$k_p = \frac{100}{904} = 0,11 \text{ мм/пиксель.}$$

В результате проведенных экспериментов получены смещения (Таблица 1) контрольных точек на образце без выреза под нагрузкой ( $dx_1, dy_1$ ), с вырезом под нагрузкой ( $dx_2, dy_2$ ). Положительные значения  $dx$  соответствуют смещению вправо, отрицательные – влево. Положительные значения  $dy$  соответствуют смещению вверх, отрицательные – вниз (направление действия нагрузки).

Таблица 1

Смещения контрольных точек в декартовой системе координат (мм)

без выреза									
№ реп.	8	7	6	5	4	3	2	1	0
угол, град	-90	-67,5	-45	-22,5	0	22,5	45	67,5	90
$dy_1$	-4,204	-4,425	-4,535	-4,314	-3,650	-2,876	-2,323	-1,881	-1,770
$dx_1$	-1,549	-1,549	-1,438	-0,996	-0,553	-0,774	-0,553	-0,774	-0,664
№ реп.	0	15	14	13	12	11	10	9	8
Угол	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225	247,5	270,00
$dy_1$	-1,770	-1,549	-1,881	-2,212	-2,987	-3,540	-3,982	-3,982	-4,204

$dx_1$	-0,664	-0,774	-0,885	-1,217	-1,438	-1,549	-1,217	-1,327	-1,549
с вырезом									
№ реп.	8	7	6	5	4	3	2	1	0
угол, град	-90	-67,5	-45	-22,5	0	22,5	45	67,5	90
$dy_2$	-5,808	-5,144	-3,706	-2,489	-0,719	1,493	3,042	4,259	5,808
$dx_2$	-2,212	-1,549	-1,770	-1,881	-1,549	-0,996	-0,885	-0,664	-1,217
№ реп.	0	15	14	13	12	11	10	9	8,00
угол, град	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225	247,5	270,00
$dy_2$	5,808	4,480	3,042	1,604	0,166	-1,604	-2,378	-4,480	-5,808
$dx_2$	-1,217	1,217	1,327	1,438	1,549	1,881	1,991	2,434	-2,212

На рис. 4 смещения  $dx_2$ ,  $dy_2$  представлены в виде графиков.

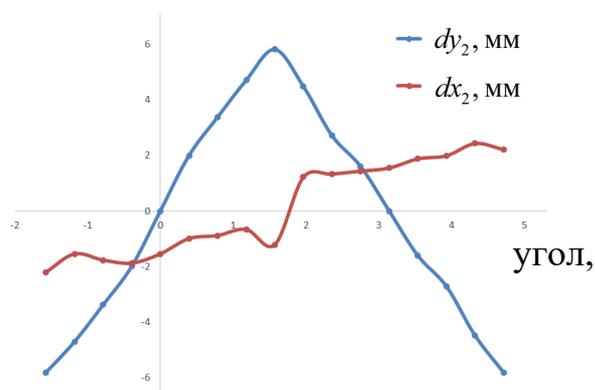


Рис. 4. Графики смещений  $dx_2$ ,  $dy_2$  в зависимости от угла реперной точки

### Эксперимент. Часть 2

Во второй части экспериментов нанесение контура вырезаемой части наносилось в нагруженном состоянии образца.

В нагруженном состоянии на образец с помощью круглого шаблона, имеющего диаметр 199 мм, был нанесен контур вырезаемого отверстия. По краям окружности отмечались 16 контрольных точек (рис. 5а).

После этого происходило вырезание отверстия по внутренней границе контура. По завершении производилась фотофиксация контрольных точек (рис. 5б). Далее была проведена фотофиксация соответствующих контрольных точек на вырезанном участке образца (рис. 5в).

В результате проведенных экспериментов получены смещения контрольных точек на образце после выреза (внешняя окружность  $dx_1$ ,  $dy_1$ ), на вырезанном участке (внутренняя окружность  $dx_2$ ,  $dy_2$ ).

Полные смещения контура выработки представляют собой сумму смещений контура внешней части и смещений контура внутренней части, взятых с обратным знаком ( $dx_1 - dx_2$ ,  $dy_1 - dy_2$ ). Полученные данные приведены в таблице 3 и соответствующих графиках на рис. 6.

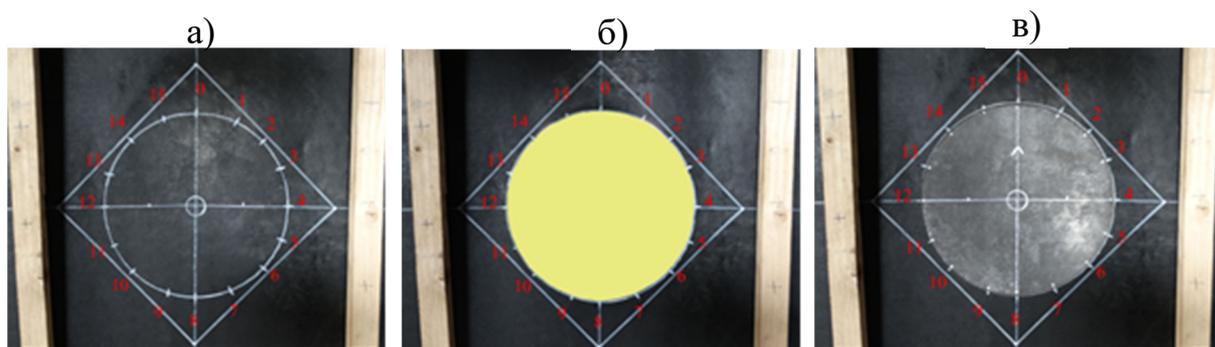


Рис. 5. Образец: (а) в нагруженном состоянии и последующим нанесением на него контура окружности, (б) в нагруженном состоянии и с вырезанным отверстием, (в) вырезанная окружность в свободном состоянии

Таблица 3

Смещения (мм) контрольных точек на образце после выреза ( $dx_1, dy_1$ ), на вырезанном участке ( $dx_2, dy_2$ ) и полные смещения (мм) ( $dx_1 - dx_2, dy_1 - dy_2$ ) в реперных точках.

		Внешняя часть								
		8	7	6	5	4	3	2	1	0
$dx_1$		-0,111	-0,332	-0,442	-0,664	-0,553	-0,553	-0,553	-0,774	0,000
$dy_1$		-3,706	-2,600	-1,604	-1,051	0,277	1,162	1,936	2,931	3,706
		0	15	14	13	12	11	10	9	8
$dx_1$		0,000	0,553	0,442	0,664	0,553	0,442	0,442	0,442	-0,111
$dy_1$		3,706	2,821	1,936	1,162	0,277	-0,719	-1,383	-2,489	-3,706
		Внутренняя часть								
		8	7	6	5	4	3	2	1	0
$dx_2$		0,000	0,332	0,553	0,111	1,549	1,881	1,438	1,106	0,664
$dy_2$		2,212	2,655	2,655	1,770	1,217	0,553	-0,442	-1,106	-2,212
		0	15	14	13	12	11	10	9	8
$dx_2$		0,664	0,000	-0,996	-1,549	-1,106	0,111	0,000	0,332	0,000
$dy_2$		-2,212	-1,991	-1,881	0,000	0,996	1,770	1,549	1,991	2,212
		Полные смещения								
		8	7	6	5	4	3	2	1	0
$dy_1 - dy_2$		-5,918	-5,254	-4,259	-2,821	-0,940	0,608	2,378	4,038	5,918
$dx_1 - dx_2$		-0,111	-0,664	-0,996	-0,774	-2,102	-2,434	-1,991	-1,881	-0,664
		0	15	14	13	12	11	10	9	8
$dy_1 - dy_2$		5,918	4,812	3,816	1,162	-0,719	-2,489	-2,931	-4,480	-5,918
$dx_1 - dx_2$		-0,664	0,553	1,438	2,212	1,659	0,332	0,442	0,111	-0,111

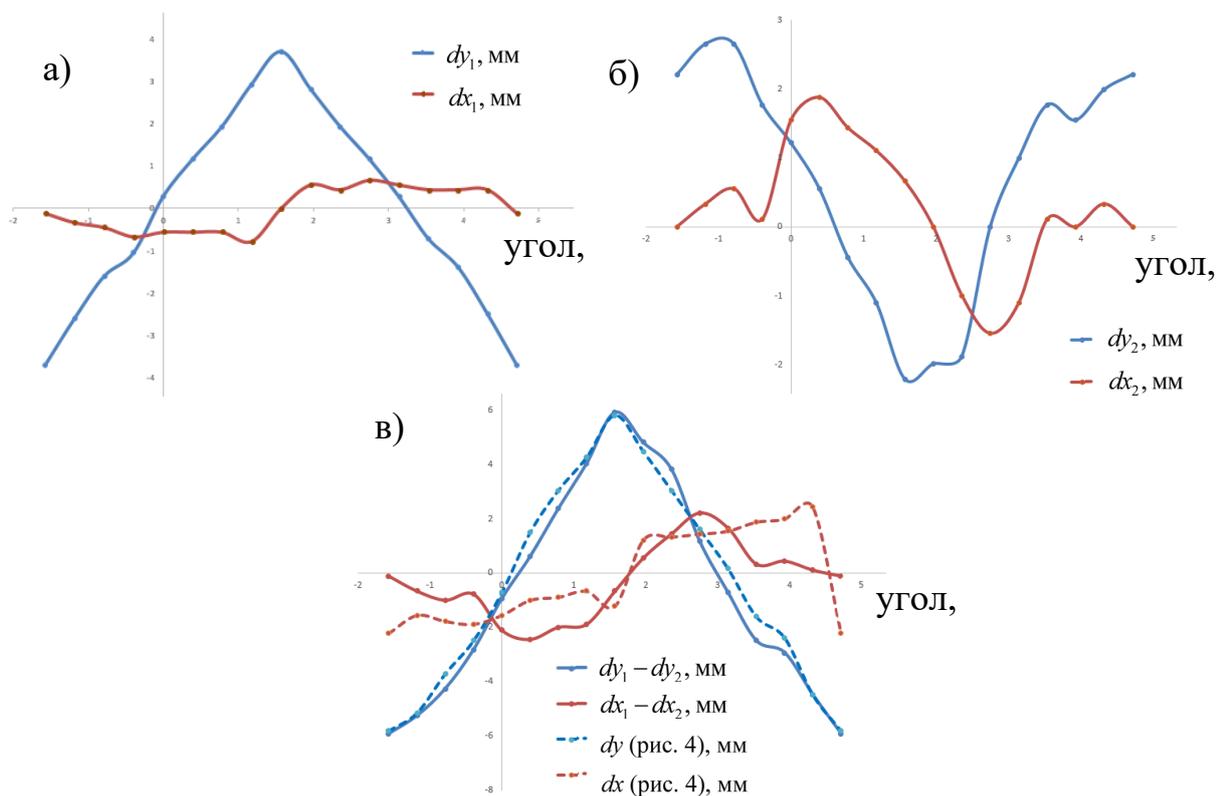


Рис. 6. Графики смещений  $dx$  и  $dy$  в зависимости от угла реперной точки: а) внешняя окружность; б) внутренняя окружность; в) полные смещения

Графики рис. 6в показывают удовлетворительное сходство с графиками рис. 4, что говорит о применимости указанной методики для определения полных смещений контура выработки.

### **Заключение**

Показано, что полные смещения контура выработки представляют собой сумму слагаемых – слагаемого, связанного с образованием скважины, и слагаемого, обусловленного начальным нагружением массива пород. Проведена серия экспериментов на резиноподобных материалах, в которых отверстие образовывалось до нагружения материала и под загрузкой.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-17-00188.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Хаст Н., Нильсон Т. Измерение напряжений в скальных породах и их значение для строительства плотин // Проблемы инженерной геологии. - Вып. 4. -М.: Мир, 1967. - С. 94 - 105.
2. Влох Н. П., Зубков А. В., Феклистов Ю. Г. Совершенствование метода щелевой разгрузки // Диагностика напряженного состояния породных массивов: Сборник научных трудов. – 1980. – С. 30 – 35.
3. Феклистов Ю.Г. Деформационный способ комплексного определения напряженного состояния и упругих характеристик горных и строительных объектов // Проблемы недропользования. 2017. №4 (15). С 28-32.

4. Leeman E. R. The measurement of stress in rock: a review of recent developments (and a bibliography) // Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, Lab. Nac. de Eng. Civil. Lisbon. 1971. P. 200–229.
5. Кузнецов С. В., Савостьянов Е. В. Способ измерения механических напряжений в массиве горных пород // Патент РФ 846730, 15.07.1981 Бюл. № 26.
6. Ljunggren C. An overview of rock stress measurement methods // Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. – 2003. – V. 40. – P. 975-989
7. Курленя, М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород – Новосибирск: Наука, 1999. – 219 с.
8. Курленя М. В., Попов С. Н. Теоретические основы определения напряжений в горных породах. – Наука. Сиб. отд-ние, 1983.
9. Ju W., Jiang B., Miao Q. et al. Variation of in situ stress regime in coal reservoirs, eastern Yunnan region, South China: Implications for coalbed methane production // AAPG Bulletin. – 2018. – Т. 102. – №. 11. – С. 2283-2303.
10. Чанышев А. И., Плохих В. В., Городилов Л. В., Абдулин И. М., Чещин Д. О. Способ определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Патент РФ 2812358, 30.01.2024 Бюл. № 4.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, Д. О. Чещин, В. В. Плохих, 2024

*А. О. Гордеева<sup>1\*</sup>, Л. Н. Константинова<sup>1</sup>, С. А. Моисеев<sup>1,2</sup>, Е. В. Белова<sup>1</sup>*

## **Итоги лицензирования недр центральных и южных районов Красноярского края (Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция)**

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: gordeevaao@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Приведены результаты лицензирования недр на территории центральных и южных районов Красноярского края по состоянию на 31.12.2023 г. В настоящее время лицензии на поиски, разведку и эксплуатацию месторождений нефти и газа выданы 21 компании на 72 участка, из которых лидерами по количеству действующих лицензий являются ООО «Иркутская нефтяная компания» и «Сибирь» (ООО «Красноярская нефтегазовая компания»). Больше всего участков распределенного фонда недр расположено в Байкитской нефтегазоносной области, меньше – в Северо-Тунгусской. В 2004-2017 гг. открыто 10 месторождений нефти и газа, максимум открытий пришлось на 2008-2014 гг.

**Ключевые слова:** недропользование, Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция, Красноярский край, лицензирование

*A. O. Gordeeva<sup>1</sup>, L. N. Konstantinova<sup>1\*</sup>, S. A. Moiseev<sup>1,2</sup>, E. V. Belova<sup>1</sup>*

## **The results of licensing the subsoil of the central and southern regions of the Krasnoyarsk region (Leno-Tunguska oil and gas province)**

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State University (NSU), Russian Federation

**Abstract.** The results of licensing of subsurface resources in the central and southern regions of the Krasnoyarsk region as of 31.12.2023 are presented. Currently, licenses for the search, exploration and operation of oil and gas fields have been issued to 21 companies for 72 sites, of which Irkutsk Oil Company LLC and Sibir LLC (Krasnoyarsk Oil and Gas Company LLC) are the leaders in the number of valid licenses. Most of the distributed subsoil fund sites are located in the Baikit NGO, less in the North Tunguska oil and gas region. In 2004-2017, 10 oil and gas fields were discovered, the maximum discoveries occurred in 2008-2014.

**Keywords:** subsoil use, Leno-Tunguska oil and gas province, Krasnoyarsk region, licensing of mineral resources

Современное недропользование в Красноярском крае начало формироваться с момента принятия Закона РФ «О недрах» [1] в 1992 г. Первые лицензии на поиски и разведку месторождений нефти и газа выдавались на участки с уже открытыми и даже разрабатываемыми месторождениями или их блоками, например: Юрубчено-Тохомское, Курумбинское, Оморинское, Агалеевское и др. Начиная с 2004 г. недропользователи начали обращать внимание на другие перспек-

тивные на нефть и газ участки, на которых в результате проведенных сейсморазведочных работ и разведочно-поискового бурения были получены притоки углеводородов, и открыты месторождения нефти и газа.

На территории Красноярского края перевод участков нераспределенного фонда недр (НФН) в распределенный осуществляется в соответствии с «Программой геологического изучения и предоставления в пользование месторождений УВ-сырья Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия)» (2005-2007 гг.), целью которой является ресурсное обеспечение трубопроводной системы ВСТО [2-7 и др.].

В настоящее время в Красноярском крае лицензии на геологическое изучение, разведку, поиски и добычу УВ выданы 21 компании на 72 участка (рис. 1). На рисунке участки, лицензии на которые выданы компаниям, образующими единый холдинг или являющихся дочерними для головной компании-недропользователя, такими как ПАО «НК «Роснефть»» или ПАО «Газпром», окрашены в единый цвет.

В 1993-2023 гг. было выдано 220 лицензий на участки недр, из которых 69 были аннулированы, а 79 переоформлены в связи с изменением статуса юрлица компании-недропользователя или площади участка. В период с 2008 по 2020 гг. из НФН в РФН перешли 11 участков, что позволило возобновить геологоразведочные работы в Нижнеангарском СНГР (6), Байкитской (4) и Присяяно-Енисейской НГО (1). Снижение интереса недропользователей к участкам НФН обусловлена их низкой изученностью.

Самое большое количество лицензий на участки недр выдано ООО «Иркутская нефтяная компания» (ИНК) (19), далее идут ООО «Красноярская нефтегазовая компания» (ныне ООО «Сибирь») (14), на третьем месте занимает ПАО «Газпром» (10 лицензий), далее места распределились между ПАО НК «Роснефть» (6) и ООО «Славнефть-Красноярскнефтегаз» (5) (см. рис. 1).

По состоянию на 31.12.2023 г. преобладающее количество лицензий (44) выдано на геологическое изучение, поиски, разведку и разработку полезных ископаемых (НР), что составляет 61% от общего количества действующих лицензий и занимает по площади 70% от общей площади РФН изучаемой территории Красноярского края (табл. 1, рис. 2, 3). На геологическое изучение, включающее поиски и оценку месторождений полезных ископаемых (НП), выдано 24 лицензии, что составляет 33% от общего количества действующих лицензий и занимает по площади 29%. На разведку и добычу полезных ископаемых (НЭ) – четыре лицензии, и это 5,6% от общего количества действующих лицензий, занимаемая площадь которых составляет всего лишь 0,4 % от общей исследуемой площади распределенного фонда недр. Здесь площади значительно меньше участков и включают отдельные залежи на средних и мелких по запасам месторождениях, которые были открыты компаниями-недропользователями (Ново-Юдуконское, Шушукское, участки № 1 и 2 Пайгинского месторождения).

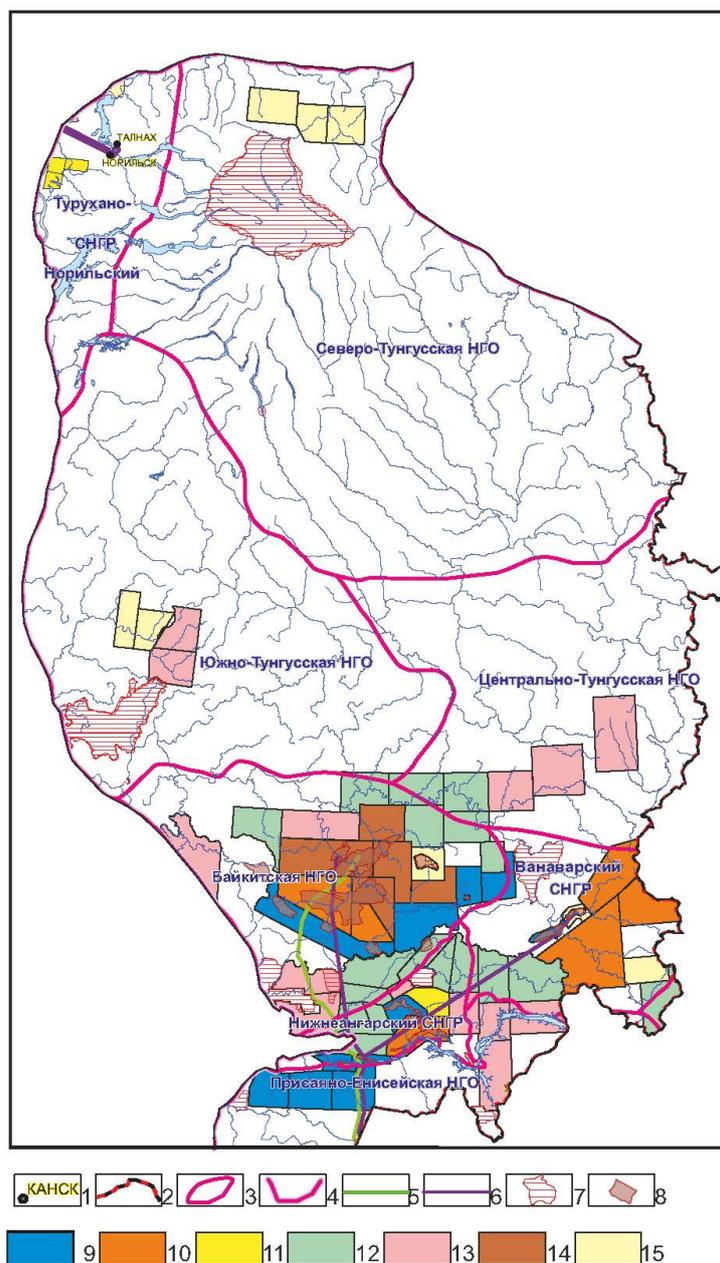


Рис. 1. Обзорная карта участков распределенного фонда недр центральных и южных районов Красноярского края по состоянию на 31.12.2023 г.

1 – города, 2 – административная граница Красноярского края, 3 – границы НГО, 4 – границы Лено-Тунгусской НПП, 5 – нефтепроводы, 6 – газопроводы, 7 – особо охраняемые природные территории, 8 – месторождения нефти и газа, 9–15 – лицензии головных компаний-недропользователей: 9 – ПАО «Газпром», 10 – ПАО «НК «Роснефть», 11 – ПАО «Сургутнефтегаз», 12 – ООО «Иркутская нефтяная компания», 13 – ООО Сибирь (ООО «Красноярская нефтегазовая компания»), 14 – ООО «Славнефть-Красноярскнефтегаз», 15 – лицензии других компаний недропользователей

Таблица 1

Распределение действующих лицензий по типам на территории центральных и южных районов Красноярского края по состоянию на 31.12.2023 г.

Вид лицензий	Количество участков, шт.	Площадь участков распределенного фонда недр, км <sup>2</sup>	Доля площади целевых участков от общей площади распределенного фонда недр, %
НП	24	56739,73	29,62
НР	44	134030,20	69,97
НЭ	4	777,95	0,41
<b>Всего</b>	<b>72</b>	<b>191547,88</b>	<b>100</b>

На диаграммах показано общее распределение действующих лицензий по типам (НР, НП и НЭ) в % от общего количества действующих лицензий и от суммарной площади распределенного фонда недр (см. рис. 2).

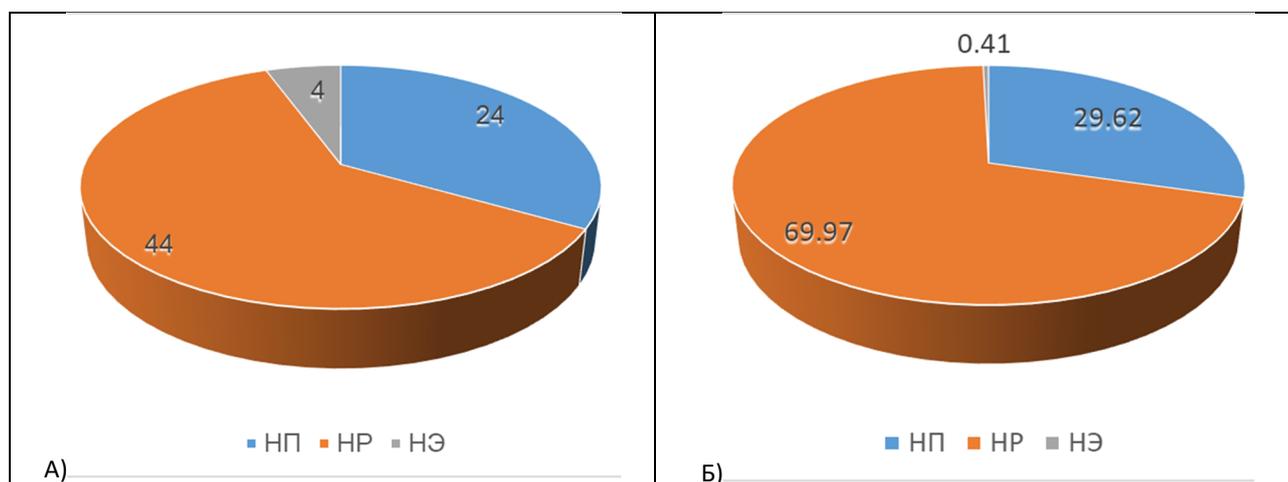


Рис. 2 Диаграммы распределения в центральных и южных районах Красноярского края по состоянию на 31.12.2023 г.: А) действующих лицензий на право пользования недрами по типам (НП, НР, НЭ) на участки недр (в % от общего количества действующих лицензий); Б) площадей действующих лицензий на право пользования недрами по видам (НП, НР, НЭ) на участки недр (в % от суммарной площади распределенного фонда недр)

На рисунке 3 показано каким образом распределены участки недр между головными компаниями-недропользователями и их дочками по видам выданных лицензий.

В таблице 2 показано как распределены площади участков недр между головными компаниями-недропользователями и их дочками по видам выданных лицензий, что составляет для: ООО «ИНК» и ООО «КНК» – по 24-25%, ПАО НК «Роснефть» – 14 %, ПАО «Газпром» – 10 %, ООО «Славнефть-Красноярскнеф-

тегаз» – 9,6%. Остальные недропользователи имеют менее 5 лицензий, площади которых не превышают 6% от изучаемой территории РФН.

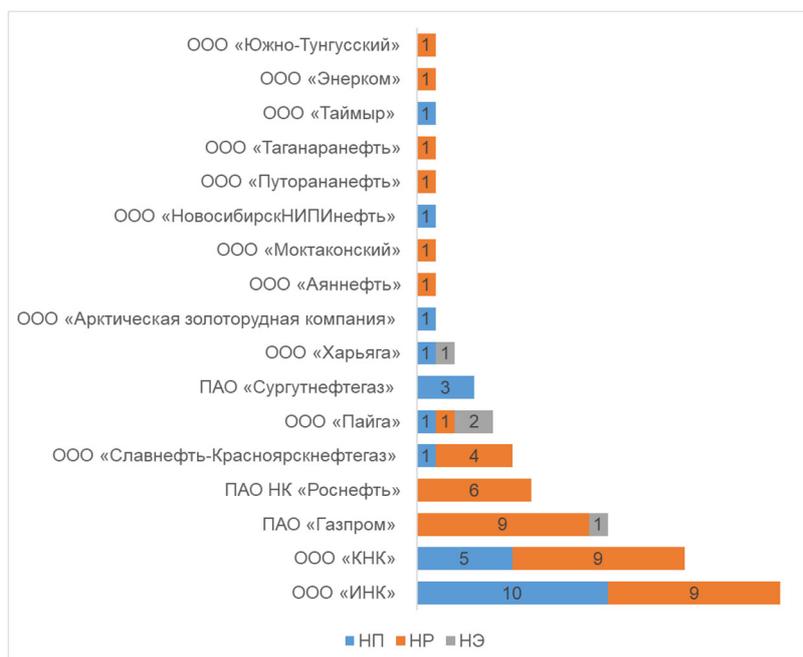


Рис. 3 Диаграмма распределения количества действующих лицензий на право пользования недрами компаниями-недропользователями на территории центральных и южных районов Красноярского края по состоянию на 31.12.2023 г.

Таблица 2

Распределение площадей участков по видам действующих лицензий на территории центральных и южных районов Красноярского края по состоянию на 31.12.2023 г.

Компания-недропользователь	Площадь участков, км <sup>2</sup>			Всего,	
	NP	НР	НЭ	км <sup>2</sup>	%
ООО «ИНК»	29 224	18 111	0	47 335	24.7
ООО «Красноярская нефтегазовая компания» (ООО «Сибирь»)	20 275	26 509	0	46 784	24.4
ПАО «Газпром»	0	19 623	56	19 679	10.3
ПАО НК «Роснефть»	0	27 584	0	27 584	14.4
ООО «Славнефть-Красноярскнефтегаз»	2 251	16 081	0	18 332	9.6
ООО «Пайга»	476	2 944	274	3 693	1.9
ПАО «Сургутнефтегаз»	1 431	0	0	1 431	0.7
ООО «Харьяга»	1 653	0	448	2 101	1.1
ООО «Арктическая золоторудная компания»	484	0	0	484	0.3
ООО «Аяннефть»	0	2 080	0	2 080	1.1
ООО «Моктаконский»	0	2 081	0	2 081	1.1
ООО «НовосибирскНИПинефть»	474	0	0	474	0.2
ООО «Путорананефть»	0	2 700	0	2 700	1.4
ООО «Таганаранефть»	0	3 200	0	3 200	1.7
ООО «Таймыр»	471	0	0	471	0.2
ООО «Энерком»	0	10 986	0	10 986	5.7
ООО «Южно-Тунгусский»	0	2 132	0	2 132	1.1
<b>Всего</b>	<b>56 740</b>	<b>134 030</b>	<b>778</b>	<b>191 548</b>	<b>100</b>

Несколько иная картина будет, если рассматривать распределение действующих лицензий по НГО и СНГР (таблица 3). В таблице показано, что действующие лицензии распределяются следующим образом: Байкитская НГО (25 участков недр – 34,7% от количества участков РФН на изучаемой территории и 42% от площади РФН), Ванаварский (11 – 15,3%, занимаемая площадь – 16,4%) и Нижнеангарский СНГР (12 – 16,7 и 10,2% занимаемой площади от общей площади РФН). На остальных НГО участках РФН находится гораздо меньше (рис. 4, 5). Наибольшее количество лицензий выдано на участки, расположенные в Байкитской НГО (НП – 8, НР – 15, НЭ – 2), меньше всего лицензий выдано на участки Северо-Тунгусской НГО, что связано с малой ее изученностью и чрезвычайно сложным геологическим строением, большой насыщенностью осадочного чехла траппами.

Таблица 3

Распределение действующих лицензий по нефтегазоносным областям и самостоятельным районам и их площадям относительно общей площади центральных и южных районов Красноярского края

НГО, СНГР	Количество лицензий, шт.	Доля лицензий от общего количества, %	Площадь, занимаемая участками РФН, км <sup>2</sup>	Доля площадей участков РФН от общей площади всех участков РФН, %
Байкитская НГО	25	34.7	80 596	42.1
Ванаварский СНГР	11	15.3	31 430	16.4
Нижнеангарский СНГР	12	16.7	19 471	10.2
Присяяно-Енисейская НГО	6	8.3	18 745	9.8
Северо-Тунгусская НГО	3	4.2	7 980	4.2
Турухано-Норильский СНГР	6	8.3	2 860	1.5
Центрально-Тунгусская НГО	5	6.9	20 692	10.8
Южно-Тунгусская НГО	4	5.6	9 773	5.1
<b>ВСЕГО</b>	<b>72</b>	<b>100</b>	<b>191 548</b>	<b>100</b>

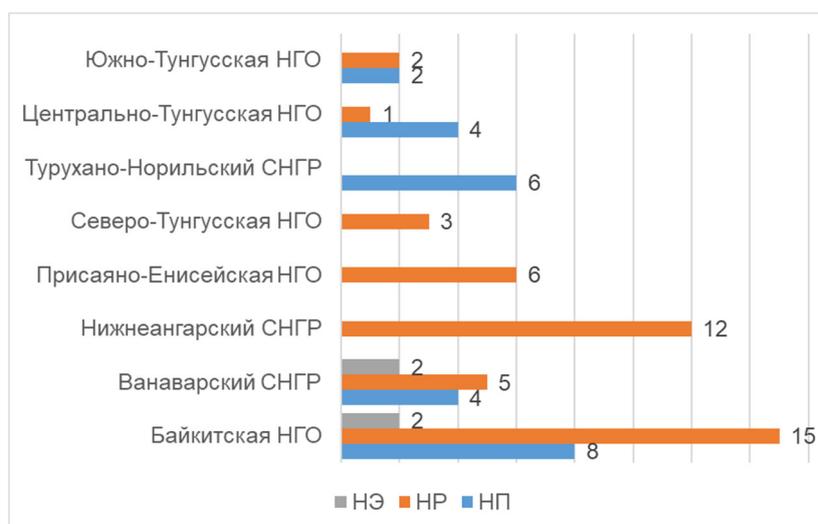


Рис. 4. Распределение лицензий (шт.), выданных на участки недр в центральных и южных районах Красноярского края, по их типам



Рис. 5. Распределение площадей (км<sup>2</sup>) участков РФН по видам выданных на них лицензий в центральных и южных районах Красноярского края по состоянию на 31.12.2023 г.

За годы действия современной системы недропользования по состоянию на 31.12.2023 г. на территории центральных и южных районов Красноярского края открыты следующие месторождения: Камовское нефтяное (ООО «Красноярскгаздобыча», 2008 г.), Шушукское газоконденсатнонефтяное (ООО «Харьяга», 2008 г.), Борщевское нефтяное (ООО «Межрегиональная топливная компания», 2009 г.), Салаирское нефтегазоконденсатное (ООО «Газпром добыча Красноярск», 2010 г.), Исчухское газовое (ООО «Харьяга», 2011 г.), Ново-Юдуконское газоконденсатное (ОАО «Красноярскгазпром», 2011 г.). Также в 2002-2014 гг. открыты новые залежи на Юрубчено-Тохомском месторождении следующими недропользователями: ООО «Славнефть-Красноярскнефтегаз», ПАО НК «Роснефть» и АО «Востсибнефтегаз», а в период с 2007–2015 гг. в рифейском карбонатном нефтегазоносном комплексе на Куюмбинском газоконденсатнонефтяном месторождении открыты залежи ООО «Славнефть-Красноярскнефтегаз». Берямбинское газоконденсатное (2004 г.), Абаканское газовое (2010 г.), Ильбокичское газоконденсатное (2012 г.), и Восточно-Имбинское газовое (2014 г.) месторождения открыты ПАО «Газпром».

*Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0008 «Цифровые геолого-геофизические модели Лено-Тунгусской и Лено-Вилюйской нефтегазоносных провинций, анализ закономерностей размещения нефтяных и газовых месторождений, оценка перспектив нефтегазоносности в основных продуктивных комплексах верхнего протерозоя и фанерозоя, включая карбонатные горизонты венда и кембрия с трудноизвлекаемыми ресурсами, изучение влияния интрузий траппов на нефтегазоносность».*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Закон РФ «О недрах» от 21.02.1992 N 2395-1.
2. Приказ № 219 МПР РФ от 29 июля 2005 года «Об утверждении программы геологического изучения и предоставления в пользование месторождений углеводородного сырья Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия)».
3. Программа геологического изучения и предоставления в пользование месторождений углеводородного сырья Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия). – Новосибирск - Москва, 2005-2008. Москва: МПР. – 2005. – 55 с.
4. Конторович А.Э., Еремин Ю.Г., Лившиц В.Р., Моисеев С.А., Филимонова И.В. Некоторые вопросы методики геолого-экономической оценки перспектив наращивания сырьевой базы и эффективности освоения ресурсов углеводородов Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия) // Пути повышения эффективности геологоразведочных работ на нефть и газ в восточной Сибири и Республике Саха (Якутия): материалы всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск, 2006б. – С. 273-275.
5. Конторович А.Э., Коржубаев А.Г., Моисеев С.А., Шемин Г.Г., Еремин Ю.Г., Изаров В.Т., Мандельбаум М.М., Санеев Б.Г., Платонов Л.А., Сафронов А.Ф. Нефтегазовый комплекс Восточной Сибири и Дальнего Востока: сырьевая база, перспективы развития // ГЕО-Сибирь-2006. Т. 5. Недропользование. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки. – Новосибирск: СГГА, 2006а. – С. 76-82.
6. Моисеев С.А., Топешко В.А., Ерёмин Ю.Г. Состояние лицензирования и геолого-экономическая оценка освоения участков нераспределенного фонда недр в Восточной Сибири на примере Иркутской области // III международный научный конгресс «ГЕО-Сибирь-2007» 25-27 апреля. Т. 5 «Недропользование, новые направления и технологии поиска, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых». – Новосибирск: СГГА, 2007. – С. 119-121.
7. Варламов А.И., Герт А.А., Ефимов А.С., Супрунчик Н.А., Старосельцев К.В. Ход реализации программы геологического изучения и предоставления в пользование месторождений углеводородного сырья Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия) // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2007. – № 5. – С. 3-8.

© А. О. Гордеева, Л. Н. Константинова, С. А. Моисеев, Е. В. Белова, 2024

*Е. В. Гоосен<sup>1</sup>, В. И. Клишин<sup>1</sup>, С. М. Никитенко<sup>1\*</sup>*

## **Производственные цепочки в угольной отрасли: состояние и перспективы**

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,  
г. Кемерово, Российская Федерация  
\* e-mail: nsm.nis@mail.ru

**Аннотация.** Мировой политический кризис и климатическая повестка ставят угольную отрасль в крайне уязвимое положение и заставляют искать новую интенсивную, адаптивную и гибкую модель ее развития. В статье проведён анализ текущего состояния отрасли и на основе современной интерпретации концепта Й. Шумпетера предложен подход к трансформации угольной отрасли. Он предполагает смену приоритетов и переход с экспортноориентированной модели развития на модель, ориентированную на преимущественное развитие внутреннего рынка, внедрение высокотехнологических и экологически нейтральных инноваций, воплощенных в гибких адаптивных производственных цепочках. В статье использованы данные Energy Institute, Росстата, ФТС России, данные угольных компаний. При обосновании своего подхода авторы используют методы сравнительного анализа и вторичный анализ патентной аналитики.

**Ключевые слова:** угольная отрасль, производственные цепочки, перспективные технологии

*E. V. Goosen, V. I. Klishin, S. M. Nikitenko\**

## **Production chains in the coal industry: status and prospects**

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS,  
Kemerovo, Russian Federation  
\* e-mail: nsm.nis@mail.ru

**Abstract.** The global political crisis and climate agenda put the coal industry in an extremely vulnerable position and force us to look for a new intensive, adaptive and flexible model of its development. The article analyzes the current state of the industry and, based on a modern interpretation of J. Schumpeter's concept, proposes an approach to transforming the coal industry. It involves a change of priorities and a transition from an export-oriented development model to a model focused on the primary development of the domestic market, the introduction of high-tech and environmentally neutral innovations embodied in flexible adaptive production chains. The article uses data from the Energy Institute, Rosstat, the Federal Customs Service of Russia, and data from coal companies. To justify their approach, the authors use comparative analysis methods and secondary analysis of patent analytics.

**Keywords:** coal industry, industrial chains, advanced technologies

### ***Введение***

Мировой политический кризис и климатическая повестка ставят угольную отрасль в крайне уязвимое положение и заставляют искать новую интенсивную, адаптивную и гибкую модель ее развития. В настоящее время просматриваются

два потенциальных сценария развития мировой и отечественной промышленности: первый – сокращение добычи угля, отказ от угольной генерации, установление высоких трансграничных налогов на использование угля в производстве продуктов, второй – сохранение конкурентоспособности отрасли с помощью перехода на новую устойчивую интенсивную модель развития [1].

### *Методы и материалы*

Методологической основой исследования послужил концепт энергоперехода с позиций Й. Шумпетера и его современная интерпретация. Он предполагает сохранение в обозримом будущем угольной отрасли на основе высокотехнологических и экологически нейтральных инноваций, воплощенных в гибких адаптивных производственных цепочках [2,3]. В статье использованы данные Energy Institute, Росстата, ФТС России, данные угольных компаний. При обосновании своего подхода авторы используют методы сравнительного анализа и вторичный анализ патентной аналитики.

### *Результаты*

#### *Мировая угольная индустрия*

В 2020 году эксперты Международного энергетического агентства (МЭА) прогнозировали, что мировой спрос на уголь «вероятно, достиг своего пика в 2013 году, в настоящее время стагнирует и, скорее всего, в дальнейшем будет снижаться» [3, 5,6]. Однако события 2021 - 2023 годов полностью опровергли эти прогнозы. Уже на следующий год после окончания пандемии COVID-19 мировые угольные продажи выросли почти до рекордного уровня 2013-го (7,947 млрд тонн в 2021 году против 7,997 в 2013-м). А в 2022-м максимум был обновлен и составил 8,025 млрд тонн [3]. В ближайшие 20–30 лет можно ожидать роста потребления энергии, а вместе с ней роста мирового потребления угля. При этом на ситуацию в отрасли в наибольшей степени будет влиять энергетическая политика таких регионов мира как Юго-восточная Азия, где сосредоточены наиболее крупные потребители угля, и в странах Африки.

К факторам роста мирового потребления угля можно отнести: рост населения, промышленного производства и урбанизацию в развивающихся странах, в которых не завершены процессы индустриализации уголь будет еще долго рассматриваться в качестве недорогого и доступного ресурса, который обеспечивает энергетическую безопасность и экономический рост. Ожидается рост потребления угля и в Китае и Индии – основных потребителях угля на настоящий момент. и страны Юго-Восточной Азии. Все это позволяет сделать вывод, что прогноз о закате угольной отрасли является преждевременным, что высока вероятность реализации оптимистичного сценария развития мировой угольной отрасли, при котором уголь сохранит свою роль основного энергоносителя для угледобывающих и развивающихся стран, а также резервного энергоносителя, обеспечивающего стабильность в том числе ВИЭ в развитых странах .

При этом будущее мировой угольной индустрии отнюдь не безоблачно. Сохраняется целый ряд негативных факторов, что неизбежно ведет к росту рисков

развития отрасли. Помимо климатической повестки они определяются ухудшением геотехнологических условий добычи в основных угледобывающих регионах, усложнением и разрывом логистических связей в результате обострения геополитической обстановки, растущей волатильностью цен на уголь, сокращением инвестиций в отрасль. Кроме того, на наших глазах происходит смена технико-экономического уклада развития энергетического сектора и угольной отрасли как его части. Меняются технологии добычи и производства энергии, небывалыми темпами растет регионализация и локализация отраслей ТЭК и связанных ними отраслей, усиливаются страновые и региональные различия в структуре энергопотребления и энергогенерации, меняются ключевые игроки и структура рынков, направления движения потоков энергоресурсов, растет конкуренция. Бывшие экспортеры превращаются в импортеров, и наоборот. Так, например, Китай и Индия уже объявили о своих планах экспортировать уголь. На наших глазах меняются цели и приоритеты развития угольной отрасли: на место увеличения объемов добычи угля встает задача поставки качественных и недорогих энергоресурсов с заранее заданными свойствами (в том числе и по экологическим параметрам). В этих условиях России важно не потерять свою угольную отрасль и рынки сбыта.

#### *Российская угольная отрасль*

Россия входит в пятерку мировых лидеров по добыче и экспорту угля, соответственно 5 и 3 место в мире. Несмотря на негативную геополитическую ситуацию России удастся сохранять свой производственный потенциал. По данным Росстата, в России в 2023 г. было добыто 430 млн т угля, что составляет 99% к уровню 2022 г. В том числе каменных углей было добыто 339 млн т (98,3%), антрацитов – 25,7 млн т (105%). Добыча углей для коксования составила 106 млн т (98,8%). Бурых углей добыто 91,5 млн т (102%) [5,6]. Стабилизация объемов добычи было обеспечено за счет переориентации экспортных поставок на восток и роста внутреннего потребления.

Однако российская угольная отрасль в среднесрочной и долгосрочной перспективе находится в зоне высокого риска. Во многом это связано с ее экспортно-ориентированной моделью развития, которая сформировалась в начале 2000гг, начиная с 2017 года больше половины добываемой продукции поставляется за рубеж. По данным на 2023 год, крупнейшими покупателями российского угля были Китай, Индия и Южная Корея, соответственно 45%, 17% и 12% российского угольного экспорта [5,6].

Во внутреннем потреблении первичной энергии доля угля не велика, что отражается на структуре национального энергобаланса. В России она составляет около 11%, что значительно меньше, чем в большинстве других угледобывающих стран. Для сравнения в Китае, Индии, Индонезии, США на долю угля в структуре энергобаланса приходится 61%, 74%, 62% и 20%. Но уголь — самый стабильный и надежный энергоресурс. Он играет ведущую роль в энергетике. Кроме того, он в России он регулирует баланс в энергетике - выполняя роль страхового ресурса для внешнего рынка и балансирующего энергоресурса в гидроэнергетики и атомной энергетике. В теплогенерации он безальтернативный ре-

курс для производства тепла на негазифицированных территориях: в Сибири и Дальнем Востоке. И если не поменяется модель развития отрасли, в перспективе можно ожидать сокращения доли угля в первую очередь за счет роста доли в энергобалансе природного газа [3,5,6].

Экспортная ориентация отечественной угольной отрасли уже сейчас создает ряд серьезных проблем для сбалансированного развития угледобывающих регионов и добавляет целый ряд серьезных рисков развития угольной отрасли и в краткосрочной перспективе. Нестабильность конъюнктуры угольных рынков ведет к усилению конкуренции на мировых региональных угольных рынках среди стран экспортеров угля. Ценовые и валютные риски усиливают волатильность экспортных цен на мировом рынке и валютного курса. Поставки угля в АТР идут с дисконтом, который в отдельные периоды достигал 65-70% от цен по поставкам угля из Австралии. Растут логистические риски, обусловленные переориентацией грузовых потоков с европейской части страны рост дополнительной нагрузки на Восточный полигон. Идет ухудшение геотехнологических условий добычи в традиционных угледобывающих бассейнах страны и сохраняется зависимость отечественной отрасли от импортного оборудования, достигающая по отдельным видам оборудования в 2022 году 100%. Большинство угледобывающих компании до сих пор получают с экспорта угля, в регионах - центрах угледобычи, они формируют деформированную многоотраслевую структуру экономики, вытесняя из региона другие сферы хозяйства [3,5,6].

### *Обсуждение*

Несмотря на все указанные выше негативные риск-факторы, российская угольная отрасль до сих пор является одной из системообразующих отраслей в российской экономике и простое закрытие угольных предприятий неизбежно приведет к значительным социально-экономическим и экологическим рискам, как в целом стране, так и в регионах, специализирующихся на добыче угля. Соответственно, сохранение конкурентоспособности отрасли с помощью перехода на новую устойчивую интенсивную модель развития, учитывающую в том числе особенности угледобывающих регионов, является очень важной стратегической задачей.

Общеизвестно, что в основе современного производства лежат производственные цепочки [7-10]. Под производственными цепочками авторы понимают авторы понимают «...полный набор действий, который необходим для того, чтобы осуществить продвижение продукта от момента возникновения его концепции до конечного потребителя через все стадии производства, включая разработку и дизайн, обеспечение поставок сырья и промежуточных компонентов, собственно производство, маркетинг и организацию сбыта, а также обеспечение послепродажного обслуживания» [11].

Исходя из этого разработка концепции и модели реконфигурации производственных цепочек в угольной отрасли и смежных отраслях в условиях смены технико-экономического уклада развития энергетического сектора и угольной отрасли как его части и ориентированных должна быть направлена на моделиро-

вание и формирование гибких и устойчивых производственных цепочек в отрасли.

Это позволит ориентироваться на внедрение новых технологий на всех этапах технологического процесса от добычи угля и до реализации углепродукции и более взвешено оценить текущую ситуацию в отрасли в контексте текущих и перспективных риск-факторов и предложить более взвешенную стратегию трансформации угольной отрасли как в целом в стране, так и в ее отдельных угледобывающих регионах.

Важным моментом моделирования производственных цепочек должно стать выявление перспективных направлений и наилучших технических решений в области чистой угольной энергетики, оценки возможности их внедрения и оптимального размещения производств; выявления новых сегментов рынка и рыночных ниш для перспективных групп технологий и инновационной продукции, не конкурирующих с уже существующими рынками и нишами; поиска альтернативных путей диверсификации на основе комплементарных угольной отрасли производств и сбалансированного развития экономик угледобывающих регионов.

На рисунке 1 приведена карта технологических направлений переработки угля и полученной из него продукции, которая может стать основой для моделирования новых гибких производственных цепочек в При этом важно понимать сложившаяся организация производства и иерархические производственные цепочки, преобладающие в угольной отрасли в форме вертикально-интегрированных компаний необходимо сохранить. Они были и будут эффективны как минимум в течении всего периода трансформации отрасли.



Рис. 1. Карта технологических направлений переработки угля и полученной из него продукции [10]

Однако в период пертурбаций и неопределенности, когда на первый план выходят задачи стабилизации отрасли они должны быть дополнены различными

формами кооперации на горизонтальном уровне. Это позволит, не ломая резко, старые производственные цепочки повысить их текущую гибкость и устойчивость к колебаниям рынка и дифференцированно подойти к поддержке отдельных сегментов угольной отрасли, а также формированию высокотехнологичных секторов экономики в угледобывающих регионах на основе перспективных экологических инновационных технологий, реализованных в виде новых производственных цепочек.

### *Заключение*

Несмотря на преобладающую в настоящее время парадигму безуглеродной концепции развития энергетики в реальности происходит трансформация мировой и российской угольной отрасли и смена приоритетов ее развития, опирающаяся на внедрение высокотехнологических и экологически нейтральных инноваций, воплощенных в гибких адаптивных производственных цепочках.

### *Благодарности*

Исследование выполнено в рамках проекта «Зеркальные лаборатории» НИУ «Высшая школа экономики» по теме «Трансформации цепочек создания стоимости угольной отрасли и связанных с ней отраслей в условиях глобального энергоперехода и санкционного давления на российскую экономику» (Соглашение № 6.13.1-02/210723–1 от 21.07.2023 г.).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гоосен О.К. и др. Роль государственной поддержки в трансформации российской угольной отрасли// Сборник избранных научных статей и материалов VII Международной научно-практической конференции «Теория и практика стратегирования (серия «экономическая и финансовая стратегия»)» (Кемерово – Москва, 29-30 марта, 2024 г.). – Кемерово. – 2024. – С. 168-175.
2. Шумпетер Й. А. Теория экономического развития: исследование предпринимательской прибыли, капитала, кредита, процента и цикла конъюнктуры. - Москва: Прогресс, 1982. - 455 с.
3. Fischer B. et al. Global value chains and regional systems of innovation: Towards a critical juncture? /B. Fischer, D. Meissner, R. Boschma, N. Vonortas //Technological Forecasting and Social Change. – 2024. – С. 123245.
4. Statistical Review of World Energy. 72nd edition. Energy Institute, 2023 – 64 p. URL:[https://www.energyinst.org/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0004/1055542/EI\\_Stat\\_Review\\_PDF\\_single\\_3.pdf](https://www.energyinst.org/__data/assets/pdf_file/0004/1055542/EI_Stat_Review_PDF_single_3.pdf) (дата обращения: 24.03.2024).
5. Мешков Г. Б., Петренко И. Е., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год //Уголь. – 2024. – Т. 1178. – №. 3. – С. 18-29.
6. Будущее угольной индустрии: рынок России до 2050 г. М.: Яков и партнеры, 2023. – 18с.
7. Кондратьев В. Б., Попов В. В., Кедрова Г. В. Трансформация глобальных цепочек стоимости: опыт трех отраслей //Мировая экономика и международные отношения. – 2020. – Т. 64. – №. 3. – С. 68-79.
8. Никитенко С. М., Гоосен Е. В. Цепочки добавленной стоимости как инструмент развития угольной отрасли //Всероссийский экономический журнал ЭКО. – 2017. – №. 9 (519). – С. 104-124.

9. Goosen E. V. et al. Evolution of VAC in the context of coal industry advance in the conditions of digitization in Russia //Eurasian mining. – 2019. – vol. 2. – P. 36-40.
10. Королев М.К., Никитенко С.М., Гоосен Е.В. Выявление потенциальных производственных цепочек переработки угля на основе патентной аналитики // Химия в интересах устойчивого развития. – 2023. – vol.31. - №5. – С. 616-622.
11. Sturgeon T. J. How do we define value chains and production networks? //IDS bulletin. – 2001. – vol. 32. – №. 3. – P. 9-18.

© *Е. В. Гоосен, В. И. Клишин, С. М. Никитенко, 2024*

*Н. Г. Акопов<sup>1\*</sup>, Е. А. Кузнецова<sup>1</sup>*

## **Особенности применения машинного обучения при прогнозировании потребления энергетических ресурсов**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: n.akopov@g.nsu.ru

**Аннотация.** В данной статье был спрогнозирован спрос на природный газ в Китае с помощью методов машинного обучения. Были выбраны наиболее подходящие модели, способные справиться с проблемой мультиколлинеарности, такие как случайный лес, градиентный бустинг и гребневая регрессия, а также отобраны факторы, наиболее полно отражающие спрос на газ с различных сторон. Для каждой из построенных регрессий были оценены ошибки и влияние каждого фактора на объясняемую переменную. Лучшие результаты показала модель с применением градиентного бустинга. Итогом исследования стало понимание значимости природного газа как ресурса для стран и возможности использования методов машинного обучения для дальнейшего исследования спроса на данный ресурс. Подтверждено предположение авторов о значимости численности населения и площади городов для спроса на газ.

**Ключевые слова:** природный газ, машинное обучение, спрос на природный газ, прогнозирование

*N. G. Akopov<sup>1\*</sup>, E. A. Kuznetsova<sup>1</sup>*

## **Features of the use of machine learning in forecasting energy consumption**

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation  
\* e-mail: n.akopov@g.nsu.ru

**Abstract.** In this article, the demand for natural gas in China was predicted using machine learning methods. The most suitable models capable of coping with the problem of multicollinearity, such as random forest, gradient boosting and ridge regression, were selected, as well as factors that most fully reflect the demand for gas from various sides. For each of the constructed regressions, the errors and the influence of each factor on the explained variable were evaluated. The best results were shown by a model using gradient boosting. The result of the study was an understanding of the importance of natural gas as a resource for countries and the possibility of using machine learning methods to further study the demand for this resource. The authors' assumption about the importance of the population and the area of cities for gas demand is confirmed.

**Keywords:** natural gas, machine learning, natural gas demand, forecasting

### ***Введение***

В современном мире машинное обучение становится всё более востребованным инструментом в совершенно различных областях. При этом спрос на энергоресурсы постоянно растёт. Имея инструмент для моделирования спроса на

природный газ, компании могут более точно оценивать риски, моделируя различные сценарии. При этом и страны, используя похожие модели [1,2,3], смогут не допускать дефицита ресурса, что очень важно как для обычных граждан страны, так и для промышленности.

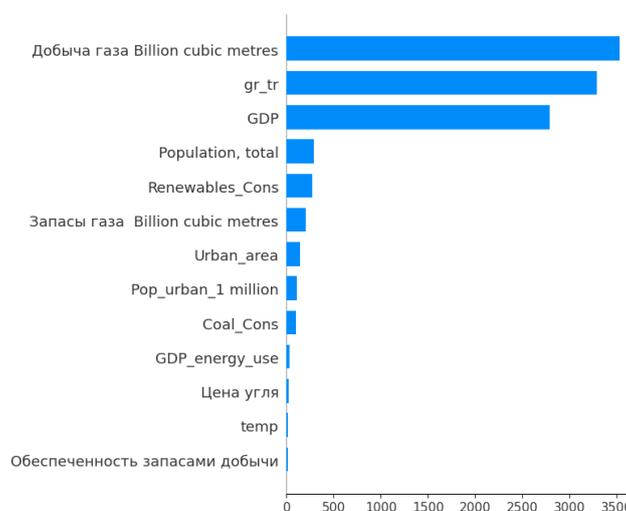
### ***Методы и материалы***

Для анализа спроса на газ были выбраны следующие факторы: валовый ВВП, ВВП на единицу потребляемой энергии, среднегодовая температура, городская территория, численность населения, население в городских агломерациях численностью более миллиона человек, годовое потребление каменного угля, годовое потребление энергии их возобновляемых источников, количество гражданского транспорта, добыча газа, запасы газа, обеспеченность запасами добычи, цена угля [4,5,6,7]. Информационной базой исследования послужил Energy Institute Statistical Review of World Energy [8].

Также достаточно важным моментом в данном исследовании являлся выбор моделей для построения регрессии. Так как при предварительном анализе данные показали достаточно большую зависимость между друг другом, то выбор моделей сократился до наиболее устойчивых к проблеме мультиколлинеарности. Из всего множества была выбрана гребневая регрессия в качестве линейной модели, а также модели случайный лес и градиентный бустинг в качестве нелинейных.

### ***Результаты и обсуждение***

Начнем анализ результатов с линейных моделей, а именно с гребневой регрессии. Значение  $R^2$  и MAPE получились равными 0,93 и 6,1% соответственно. Если же говорить о значимости коэффициентов, то она была оценена с помощью SHAP метода, ниже приведены результаты (рис. 1). По нему видно, что наибольший вклад в спрос на природный газ вносят его добыча, гражданский транспорт и ВВП. Интересным здесь кажется тот факт, что площадь городской территории (Urban\_area) вносит не такой весомый вклад, как ожидалось до получения результатов.



**Рис. 1. Значимость факторов по значениям Шэпли (гребневая регрессия)**

Далее, переходя к нелинейным моделям, хочется начать со случайного леса. Показатель  $R^2$  у данной модели получился равным 0,95, а ошибка MAPE 5,8%. Оба этих показателя лучше, чем у первоначально рассмотренной линейной модели. При анализе второй нелинейной модели, а именно градиентного бустинга, результаты получились следующими.  $R^2$  равен 0,95, MAPE 5,73%. Получилось так, что данная модель стала лучшей среди всех моделей, рассмотренных в данном исследовании. Результаты значений SHAP приведены ниже (рис. 2). Их интерпретация кажется более уместной и логичной, если сравнивать с гребневой регрессией. Тут виден явный отрыв у численности населения и добычи газа, а на третьем месте расположилась площадь городской территории.

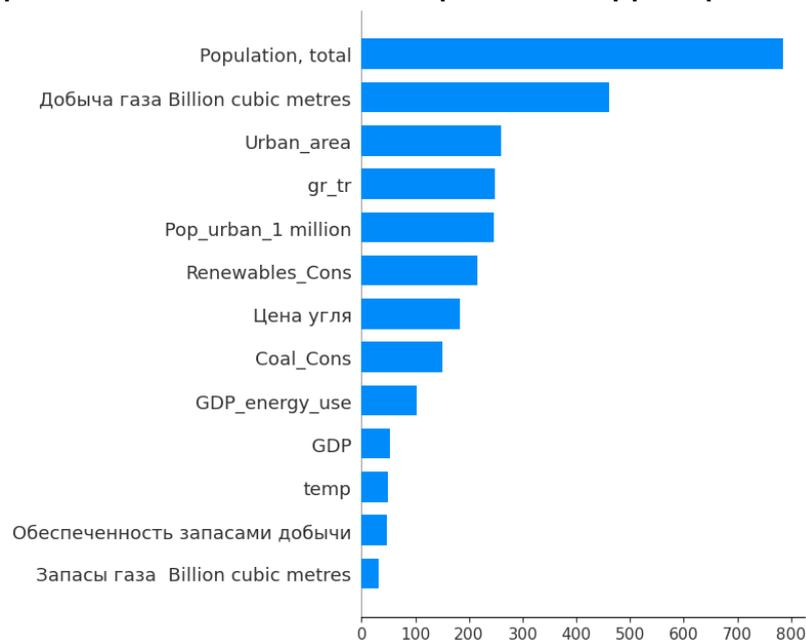


Рис. 2. Значимость факторов по значениям Шэпли (градиентный бустинг)

### ***Заключение***

Анализируя данное исследование, можно сделать вывод, что нелинейные регрессионные модели машинного обучения лучше справляются с прогнозированием спроса на природный газ. Полученные с помощью градиентного бустинга результаты подтвердили предположения авторов о том, что спрос на газ сильно зависит от численности населения, площади городов. Ведь одно из основных направлений, куда тратится данный ресурс, это газификация домов. Именно с помощью газа люди готовят еду и получают тепло в дом.

Можно сказать, что методы машинного обучения показали свою эффективность и в дальнейшем их можно использовать для прогнозирования различных макроэкономических показателей.

### ***Благодарности***

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-78-10157, <https://rscf.ru/project/23-78-10157/>.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ahmed S. et al. Prediction of Natural Gas Consumption in Bahçeşehir Using Machine Learning Models /S. Ahmed, S. Madanian, F. Mirza, S. Zain //Association for Information Systems, 2021.
2. Gao F., Shao X. Forecasting annual natural gas consumption via the application of a novel hybrid model //Environmental Science and Pollution Research. – 2021. – vol. 28. – no. 17. – P. 21411-21424.
3. Zhang W., Yang J. Forecasting natural gas consumption in China by Bayesian model averaging //Energy Reports. – 2015. – vol. 1. – P. 216-220.
4. Богоявленский В. И. и др. Газовая революция в Китае /Богоявленский В. И., Баринов П. С., Богоявленский И. В., Якубсон К. И. //Бурение и нефть. – 2016. – №. 11. – С. 3-14.
5. Ершова Е. В. Природный газ в энергопотреблении Китая: основные тенденции развития //Известия Байкальского государственного университета. – 2016. – Т. 26. – №. 1. – С. 80-89.
6. Резникова О. Б. Нефть и газ Центральной Азии: разворот на рынок КНР //Серия—Библиотека Института мировой экономики международных отношений – 2014. – С. 6.
7. Халова Г. О., Сычева А. М., Спивак В. Ю. Деятельность китайских нефтегазовых компаний в государствах Центрально-Азиатского региона //Нефть, газ и бизнес. – 2013. – №. 12. – С. 39-43.
8. BP: Energy Institute Statistical Review of World Energy. 2023. URL: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (дата обращения 16.03.2024)

© Н. Г. Акопов, Е. А. Кузнецова, 2024

*А. Д. Бессмертных<sup>1\*</sup>, А. А. Карташевич<sup>1</sup>*

## **Возможности управления углеродным следом продукции в сфере охвата 3**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: a.bessmertnykh1@g.nsu.ru

**Аннотация.** В исследовании анализируются методы управления углеродным следом торгово-производственного предприятия, особое внимание уделяется сфере охвата 3. Была составлена сравнительная таблица методов управления выбросами парниковых газов. Проведен анализ опыта различных компаний в оценке углеродного следа, а также изучены подходы к управлению углеродным следом с акцентом на сферу охвата 3. На основании проведенного анализа была создана таблица, включающая методы управления выбросами парниковых газов, применяемые компаниями на практике. Представлены статистические данные об источниках выбросов в Российской Федерации. В ходе исследования были выявлены общие тенденции и закономерности, а также определены ключевые характеристики процесса управления углеродным следом. Определен наиболее перспективный метод управления выбросами парниковых газов, приведено его обоснование на основе проведенного анализа.

**Ключевые слова:** углеродный след, торгово-производственное предприятие, сфера охвата 3, управление углеродным следом, анализ опыта компаний, тенденции, закономерности, инструменты управления

*A. D. Bessmertnykh<sup>1\*</sup>, A. A. Kartashevich<sup>1</sup>*

## **The possibilities of managing the carbon footprint of products in the scope of 3**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation

\*e-mail: a.bessmertnykh1@g.nsu.ru

**Abstract.** The study analyzes the methods of managing the carbon footprint of a commercial and manufacturing enterprise, with special attention paid to the scope of coverage 3. A comparative table of greenhouse gas emission management methods was compiled. The analysis of the experience of various companies in assessing the carbon footprint was carried out, as well as approaches to carbon footprint management with an emphasis on scope were studied 3. Based on the analysis, a table was created that includes the methods of managing greenhouse gas emissions used by companies in practice. Statistical data on the sources of emissions in the of the Russian Federation. During the study, general trends and patterns were identified, as well as key characteristics of the carbon footprint management process were identified. The most promising method for managing greenhouse gas emissions has been identified, and its justification based on the analysis is given.

**Keywords:** carbon footprint, commercial and manufacturing enterprise, scope 3, carbon footprint management, analysis of companies' experience, trends, patterns, management tools.

### Обзор сферы охвата 3 и методов управления углеродным следом

Углеродный след – это совокупность всех выбросов парниковых газов, произведенных прямо и косвенно отдельным человеком, организацией, мероприятием или продуктом. Эти выбросы включают диоксид углерода (CO<sub>2</sub>) и метан (CH<sub>4</sub>), которые выделяются при расчистке земель, производстве и потреблении продуктов питания, топлива, промышленных товаров, материалов, древесины, строительстве дорог, зданий, использовании транспорта и различных услуг [1].

Сфера охвата 3 включает в себя косвенные выбросы парниковых газов, связанные с использованием продукции или услуг, производимых компанией. Это могут быть выбросы от сжигания топлива при эксплуатации транспортных средств, работающих на топливе, произведенном компанией, или выбросы от использования электроэнергии, выработанной на электростанциях, использующих топливо, произведенное компанией.

Значение сферы охвата 3 для управления углеродным следом заключается в том, что она охватывает широкий спектр видов деятельности и источников выбросов, которые могут быть не учтены в сферах охвата 1 и 2. Исходя из опыта компаний на сферу охвата 3 приходится более 50% выбросов. Управление выбросами в сфере охвата 3 позволяет компаниям значительно снизить общий объем выбросов парниковых газов [2].

Существуют различные методы управления выбросами парниковых газов (табл. 1).

Таблица 1

#### Основные методы управления выбросами парниковых газов

Название метода	Описание метода
Снижение объемов выбросов	Включает в себя использование более эффективных технологий и процессов, которые уменьшают количество парниковых газов, выделяемых в атмосферу. Это может быть достигнуто через переход на возобновляемые источники энергии, повышение энергоэффективности, оптимизацию производственных процессов и использование менее углеродоемких материалов.
Захват углекислого газа из атмосферы	Технологии, позволяющие извлекать CO <sub>2</sub> из воздуха и хранить его, например, в подземных резервуарах или использовать для производства полезных продуктов.
Компенсация углеродного следа	Включает в себя проекты по восстановлению лесов, улучшению качества почвы, развитию устойчивых методов сельского хозяйства и другие инициативы, направленные на поглощение CO <sub>2</sub> из атмосферы.
Использование экологических сертификатов и стандартов	Системы сертификации, такие как LEED (Лидерство в энергетическом и экологическом проектировании) и BREEAM (Метод оценки экологической эффективности зданий), помогают оценивать и улучшать экологические характеристики зданий, инфраструктуры и продукции.
Применение технологий умного дома и города	Умные системы управления энергией, освещением, отоплением и вентиляцией в зданиях и городах могут значительно сократить потребление энергии и, следовательно, выбросы парниковых газов.
Образование и просвещение	Повышение осведомленности общественности о проблеме изменения климата и важности сокращения углеродного следа через образовательные программы, кампании и мероприятия.
Использование калькуляторов углеродного следа	Онлайн-инструменты, позволяющие оценить индивидуальный или корпоративный углеродный след и предложить пути его сокращения.

Источник: составлено автором на основе [3, 4].

Говоря о снижении объёмов выбросов, можно привести статистику об источниках выбросов CO<sub>2</sub> в России (рис. 1).



Рис. 1. Источники выбросов CO<sub>2</sub> в России

Из данного рисунка видим, что самым большим источником выбросов CO<sub>2</sub> в России является производство электроэнергии и отопление. Второе и третье место по объёму выбросов делят транспорт и промышленность.

#### ***Анализ опыта компаний в управлении углеродным следом и оценка эффективности применяемых методов и инструментов***

Анализ опыта компаний в управлении углеродным следом в сфере охвата 3 показывает, что многие организации успешно применяют различные стратегии и методы для снижения своего экологического воздействия.

ИКЕА стремится стать углеродно-позитивной к 2030 году, сокращая выбросы парниковых газов в большей степени, чем их производит, при этом развивая бизнес ИКЕА.

Углеродный след включает материалы, пищевые ингредиенты, производство, транспортировку, розничные и другие операции, поездки покупателей и доставку товаров на дом, использование товара и утилизацию.

Score 1, 2 для ИКЕА – это использование электроэнергии.

Score 3 для ИКЕА – это материалы, из которых они изготавливают продукцию. То есть вред от изъятия природных материалов. Туда же входит объём углекислого газа, который могло бы потребить дерево, если бы его не срубили для использования.

ИКЕА ведёт учёт в процентном соотношении, из каких источников состоит её углеродный след (рис. 2).

ИКЕА считает выбросы ежемесячно, в ручном или автоматизированном режиме. Под автоматизированным режимом подразумевается то, что крупные ком-

пании и так следят за тем, сколько они электроэнергии потратили, и отслеживают другие показатели, поэтому эти расчёты дополнительно не производятся, а берутся уже готовые данные.

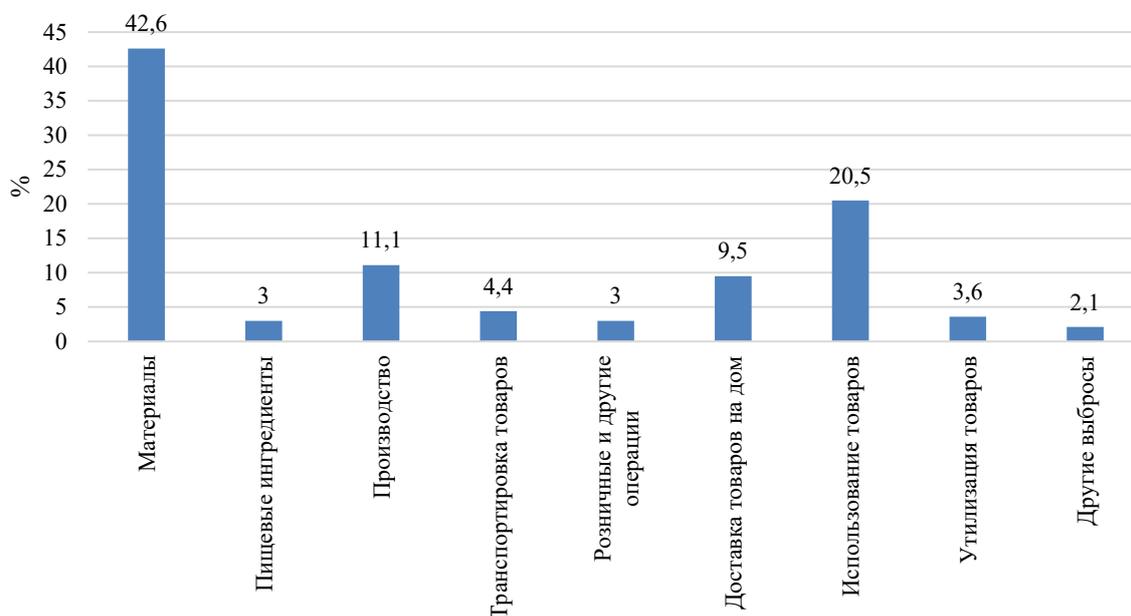


Рис. 2. Углеродный след ИКЕА

Компания X5 групп считает свои выбросы парниковых газов с 2019 года, используя международную методологию HD-протокола.

Score 1 для X5 групп – прямые выбросы парниковых газов от процессов, которыми управляет компания (собственный автотранспорт и котельные, утечки хладагентов).

Score 2 для X5 групп – косвенные энергетические выбросы парниковых газов, которые образуются при генерации электроэнергии и отопления, которые приобретаются у третьих сторон.

Score 3 для X5 групп – прочие косвенные выбросы, образующиеся в цепочке создания стоимости (от добычи сырья для производства до окончания жизненного цикла продукции). В том числе прямые и косвенные выбросы поставщиков и партнёров.

Все выбросы рассчитываются вручную, однако на рынке появляются автоматизированные системы, которые позволяют считать Score 1 и Score 2 (например, студенты НИЯУ МИФИ презентовали калькулятор, который позволяет считать выбросы парниковых газов).

X5 групп считает выбросы раз в год, циклично. От Score 1 до Score 3.

Score 1 для Норильского никеля – выбросы от производственных активов (прямые).

Score 2 для Норильского никеля – выбросы от производственных активов (косвенные).

Score 3 для Норильского никеля – переработка продукции в первом переделе (то есть, выбросы при переработке никеля во что-то ещё (никель – нержавеющая сталь, монеты) и транспортировка [4].

Score 1, 2 для LeroyMerlin - это использование электроэнергии;

Score 3 для LeroyMerlin - это выбросы при выполнении логистических операций.

В таблице ниже проводится исследование, как все перечисленные компании управляют своим углеродным следом по сфере охвата 3.

У всех компаний из вышеперечисленных Score 3 является самым объёмным с точки зрения выбросов (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительная характеристика компаний по мерам управления углеродным следом

Компания	Как управляет углеродным следом по сфере охвата 3
ИКЕА	<ul style="list-style-type: none"> <li>Использует 10% переработанных материалов и 60% возобновляемых материалов, таких как бамбук и древесина.</li> <li>Компания стремится к тому, чтобы все ее сырье было возобновляемым к 2030 году.</li> <li>ИКЕА работает над снижением углеродного следа, используя растительные продукты и электромобили.</li> <li>К 2025 году 50% блюд будут растительными, а 80% не будут содержать красного мяса.</li> </ul>
X5 групп	<ul style="list-style-type: none"> <li>Расширение ассортимента товарами растительного происхождения (молоко, майонез, заменители мяса).</li> <li>Работа с партнёрами и поставщиками (работа по снижению Score 1 и Score 2 у партнёров и поставщиков).</li> </ul>
Норильский никель	<ul style="list-style-type: none"> <li>Использование процессного подхода, основанного на информации о потреблении ТЭР в производственных процессах компаний-покупателей.</li> <li>Анализ структуры производства, видов производственных процессов, источников выбросов парниковых газов и типов используемых ТЭР для определения основных источников выбросов.</li> </ul>
LeroyMerlin	<ul style="list-style-type: none"> <li>Использование транспорта на метане;</li> <li>Плотные проекты: использование электрогрузовиков в Москве и Санкт-Петербурге.</li> </ul>

Источник: составлено автором на основе [5, 6].

Исходя из данных таблицы можем выделить следующие общие тенденции и закономерности:

1. Использование возобновляемых материалов. Компании стремятся к использованию в производстве возобновляемых материалов;

2. Переход на альтернативные виды топлива. В логистике компании стремятся к тому, чтобы использовать электромобили и автомобили на метане (или иные альтернативы);

3. Работа с партнерами и поставщиками. Компании следят за выбором партнеров и поставщиков. И считают их углеродный след по сфере охвата 1 и 2 себе в сферу охвата 3.

### ***Заключение***

В ходе исследования было выявлено, что использование возобновляемых материалов позволяет уменьшить углеродный след, поскольку они не требуют добычи и переработки ископаемого топлива, которое является основным источником выбросов парниковых газов. Возобновляемые материалы, такие как бамбук, древесина, и другие растительные продукты, имеют меньший углеродный след по сравнению с материалами, полученными из ископаемых источников, поскольку они поглощают углекислый газ в процессе роста. Таким образом, использование возобновляемых материалов способствует сокращению выбросов парниковых газов и является наиболее перспективным направлением из вышеперечисленных.

### ***Благодарности***

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-18-00424, <https://rscf.ru/project/22-18-00424/>.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Лагода Р. А. Углеродный след: главный экологический вопрос человечества //Тенденции развития науки и образования. – 2021. – №. 79-2. – С. 13-16.
2. Айл Н. и др. Как обеспечить будущее с низким углеродным следом /Н. Айл, А. Вулин, Е. Велкова, А. Баумгарднер //Control Engineering Россия. – 2020. – №. 5 (89). – С. 22. Journal of Industrial Economics. – 2021. – Т. 14. – №. 1. – С. 50-62.
3. Горбунова О. И., Каницкая Л. В. О реализации ESG-практик в России в новых условиях //Актуальные вопросы устойчивого развития современного общества и экономики. – 2023. – С. 244-248.
4. Синицына А. С., Рассамаха Д. В., Рауткин Т. А. Обеспечение углеродной нейтральности // Актуальные исследования. – 2021. – С. 12.
5. Копанская А. А. Зарубежный опыт регулирования углеродным следом // актуальные вопросы развития современных технологий. – 2022. – С. 75-78.
6. Харитоновна Н. А., Харитоновна Е. Н., Пуляева В. Н. Углеродный след России: реалии и перспективы экономического развития //Экономика промышленности / Russian Journal of Industrial Economics. – 2021. – Т. 14. – №. 1. – С. 50-62.

© А. Д. Бессмертных, А. А. Карташевич, 2024

*М. А. Близневская<sup>1</sup>, И. В. Проворная<sup>1,2\*</sup>*

## **Маршруты морских поставок российской нефти в страны АТР**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

\*e-mail: provornayaiv@gmail.com

**Аннотация.** В работе исследованы способы формирования стоимости транспортировки сырой нефти наливными танкерами. Приведены методологии нескольких международных ценовых агентств. Представлен сравнительный анализ Северного и Южного морского пути. Рассчитаны значения стоимости транспортировки товара по СМП и ЮМП из европейской части России в Китай в условиях санкционного давления и прекращения поставок российской нефти на европейский рынок, а также произошедшего в последствии высвобождения большого объема нефти в западной части России, который стало необходимо перенаправлять в страны Азии. Рассчитаны значения стоимости транспортировки за несколько предшествующих лет и представлена динамика этих значений. Показана экономическая выгода северного маршрута в сравнении с южным на протяжении всего рассматриваемого периода и выделены основные причины такой выгоды.

**Ключевые слова:** наливные танкеры, стоимость транспортировки нефти, Северный морской путь, Южный морской путь, тарифообразование

*М. А. Bliznevskaya<sup>1</sup>, I. V. Provornaya<sup>1,2\*</sup>*

## **Routes for maritime supplies of Russian oil to Asia-Pacific countries**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Novosibirsk, the Russian Federation

\*e-mail: provornayaiv@gmail.com

**Abstract.** The paper studies methods for determining the cost of transporting crude oil by liquid tankers. The methodologies of several international pricing agencies are presented. A comparative analysis of the Northern and Southern Sea Routes is presented. The cost of transporting goods along the Northern Sea Route and Southern Sea Route from the European part of Russia to China has been calculated under the condition of sanctions pressure and the cessation of Russian oil supplies to the European market, as well as the subsequent release of a large volume of oil in the western part of Russia, which became necessary to redirect to Asian countries. The values of transportation costs for several previous years are calculated and the dynamics of these values are presented. The economic profitability of the northern route in comparison with the southern route throughout the entire period under review is shown and the main reasons for such benefits are highlighted.

**Keywords:** liquid tankers, cost of oil transportation, Northern Sea Route, Southern Sea Route, tariff setting

## Введение

Российская экономика находится в сильной зависимости от состояния рынка энергоресурсов, так как является одним из ведущих экспортёров ископаемых источников энергии. Среди всех экспортируемых Россией товаров сырая нефть занимает ведущую позицию.

Учитывая текущую ситуацию и положение России на мировом рынке, произошла переориентация экспортных поставок, связанная с тем, что 5 декабря 2022 года был введён потолок цен на российскую нефть, согласно которому европейским компаниям запрещалось страховать танкеры, если цена нефти выше 60 долларов за баррель [1]. Таким образом, на рис. 1 показано, что в результате наложенных санкций высвободился большой объём сырой нефти, которая раньше экспортировалась в страны Европы, поэтому необходимо было перенаправить транспортные потоки на Азию, в частности на одного из крупнейших торговых партнёров России – на Китай.

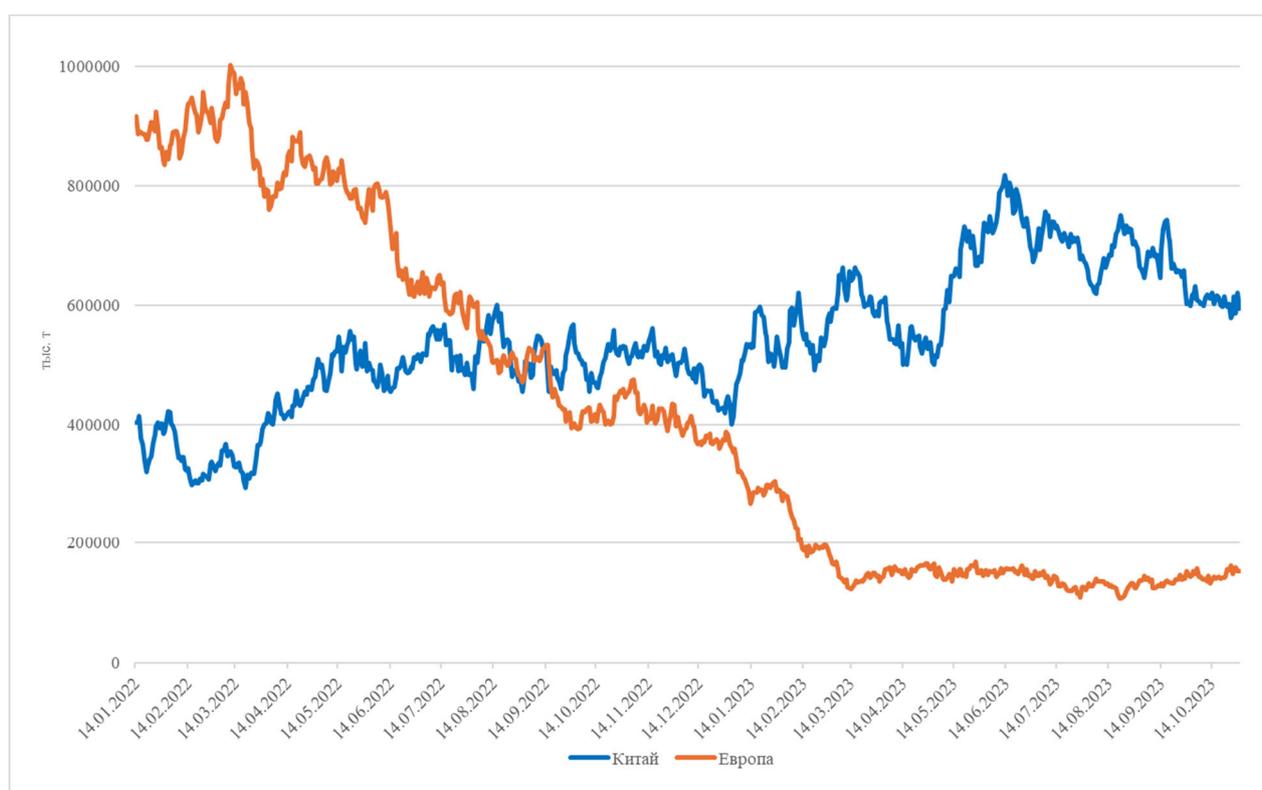


Рис. 1. Экспорт сырой нефти из России в Европу и в Китай (тыс. т)  
Источник: составлено по материалам [2]

В связи с отсутствием уже функционирующих нефтепроводов из Европейской части России в страны восточной Азии, главным видом транспорта, осуществляющим перевозку груза, стал морской транспорт, а именно – танкерные суда. Однако существует два основных маршрута в данном направлении – Северный морской путь и Южный морской путь, которые имеют свои особенности,

преимущества и недостатки, о которых будет более подробно сказано в данной работе. Все эти особенности приводят к различиям в стоимости транспортировки нефти по данным направлениям.

Цель работы – выяснить, каким путём транспортировка нефти из западной части России в Китай посредством водного транспорта является более экономически выгодной.

### *Методы и материалы*

Для расчёта стоимости транспортировки нефти были изучены методологии двух ценовых агентств: Worldscale и Argus. В качестве итоговой формулы для получения цены перевозки товара из порта европейской части России в порт Китая была получена формула [3]:

$$P = I + W + BDTI + SZ$$
$$I = S + B + C + K$$

где  $I$  – фрахтовый индекс, рассчитанный по методологии Argus,  $S$  – портовые сборы,  $B$  – сумма расходов на бункерное топливо,  $C$  – стоимость тайм-чартера,  $K$  – комиссии судовых брокеров (2,5% от стоимости фрахта),  $BDTI$  – прибалтийский индекс, который отслеживает ставки на сырую нефть,  $W$  – дополнительные страховые премии за риски,  $SZ$  – сбор за прохождение Суэцкого канала.

Далее более подробно расписаны составляющие вышеуказанной формулы. В табл. 1 представлен перечень портовых сборов актуальных для порта Усть-Луга. Расходы на бункерное топливо зависят от сорта используемого топлива, времени, затрачиваемом на преодоление маршрута и количестве затрачиваемого топлива в сутки. В нашем случае, предположим, что оба танкера расходуют 55 т/сутки и при этом для СМП и для ЮМП будет использовано топливо сорта MGO 0,1% с низким содержанием серы, так как оба маршрута проходят через Балтийское море, которое входит в зону SECA, где введён запрет на использование высокосернистого топлива [4]. Стоимость тайм-чартера зависит от дедвейта судна и от количества дней, затрачиваемых на преодоление маршрута. Таким образом, для СМП тайм-чартер равен 35 540 долл./сутки, а для ЮМП – 41 462 долл./сутки [5]. Прибалтийский индекс  $BDTI$ , который на момент времени 23.02.2024 составляет 1209 долл. [6] или 112 509,54 руб. с учётом курса на 24 февраля 2024 года. И наконец к страховым премиям за риски относятся премии за военные риски, которые определяются исходя из класса танкера, а также пиратство, которое характерно только для ЮМП.

Таблица 1

## Торговые сборы в морском порту Усть-Луга

Наименование сбора		Ставка, руб./1 GT (валовая вместимость)			
		Контейнеро- возы	Накатные, наплавные суда	Налив- ные суда	Про- чие
Канальный сбор		3,23	1,63	5,08	4,61
Лоцман- ский сбор	За опера- цию	0,52	0,26	0,81	0,74
	За милю	0,12	0,07	0,18	0,16
Маячный сбор		2,37	1,19	3,71	3,38
Навигационный сбор		3,42	1,71	5,35	4,89
В том числе СУДС		0,98	0,49	1,54	1,41
Экологический сбор		3,05	1,72	4,76	4,35
Ледоколь- ный сбор	Летняя ставка	5,65	3,25	8,85	8,09
	Зимняя ставка	14,09	7,73	22,06	20,13
Сбор транспортной без- опасности акватории морского порта		1,50	1,50	1,50	1,50
Инвестиционный сбор		17,92	-	17,92	17,92

Источник: составлено по материалам [7]

**Результаты**

Прежде чем перейти к расчёту стоимости транспортировки нефти по выбранной методологии, был проведён сравнительный анализ СМП и ЮМП. В табл. 2 представлены результаты анализа, которые свидетельствуют о наличии у обоих маршрутов как достоинств, так и недостатков.

Таблица 2

## Сравнение СМП и ЮМП

Характеристика	СМП	ЮМП
Длина маршрута	14 тыс. км	24 тыс. км
Время прохождения	25 дней	40 дней
Преимущества	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Нет пиратства;</li> <li>○ Нет штормов благодаря ледовому покрытию, которое минимизирует колебания воды.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Отсутствует необходимость в ледоколах;</li> <li>○ Вдоль маршрута развита инфраструктура, есть крупные порты.</li> </ul>

Характеристика	СМП	ЮМП
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Необходимость судов ледового класса;</li> <li>○ Недостаточно развитая инфраструктура вдоль маршрута из-за вечной мерзлоты;</li> <li>○ Ограничение пропускной способности из-за наличия льда.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Происходят атаки пиратов;</li> <li>○ Тропические штормы и тайфуны усложняют навигацию;</li> <li>○ Наличие узких мест, которые препятствуют прохождению крупногабаритных судов.</li> </ul>
Дополнительные расходы	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Высокие расходы на строительство и поддержание инфраструктуры в вечной мерзлоте;</li> <li>○ Завышение страховки на перевозку грузов в период дрейфующих льдов;</li> <li>○ Необходимость использовать ледоколы.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Необходимость нанять охрану судов для защиты от пиратства;</li> <li>○ Финансовые потери из-за штормов.</li> </ul>

Источник: составлено автором по материалам [8,9,10,11]

Далее в соответствии с выбранной методологией были рассчитаны значения стоимости транспортировки сырой нефти наливными танкерами из российского порта Усть-Луга в китайский порт Циндао для СМП и ЮМП по отдельности.

В целях проведения более точных расчётов для каждого маршрута были выбраны конкретные танкеры. Для СМП таким танкером стал «Тимофей Гуженко» класса LongRange1 [12,13], имеющий характеристики, которые представлены в табл. 3, а для ЮМП – танкер класса Suezmax [14], так как маршрут проходит через Суэцкий канал. Его характеристики представлены в табл. 4.

Таблица 3

Характеристике танкера «Тимофей Гуженко»

Характеристика	Значение
Дедвейт (т)	72722
Валовая вместимость (т)	49597
Высота борта (м)	21
Длина габаритная (м)	257,29
Ширина габаритная (м)	34,06
Осадка судна (м)	14,2
Скорость (уз)	15,7
Суммарный объём танков	12*86368
Количество переборок	9

Источник: составлено по материалам [15]

Таблица 4

## Характеристики танкера класса Suezmax

Характеристика	Значение
Дедвейт (т)	120000 – 200000
Валовая вместимость (т)	-
Высота борта (м)	-
Длина габаритная (м)	250
Ширина габаритная (м)	50 – 77,5
Осадка судна (м)	12,2 – 20,1
Скорость (уз)	14,6
Суммарный объём танков	-
Количество переборок	-

Источник: составлено по материалам [16]

В результате расчётов были получены промежуточные и итоговые значения, представленные в табл. 5.

Таблица 5

## Результаты расчётов

	СМП	ЮМП	Разница
Портовые сборы (руб.)	4 202 850	4 202 850	-
Бункерное топливо (руб.)	230 826 750	369 322 800	138 496 050
Тайм-чартер (руб.)	165 367 620	308 676 298	143 308 678
ВДТГ (руб.)	112 509,54	112 509,54	-
Страховые премии (руб.)	6 107 063	10 629 174	4 522 111
Сбор за Суэцкий канал (руб.)	0	60 001 459	60 001 459
<b>Итого (руб.)</b>	<b>416 883 388</b>	<b>770 437 447</b>	<b>353 554 059</b>

Источник: составлено автором

Затем аналогичные показатели были рассчитаны для пяти предыдущих лет, при этом важно отметить, что все переменные были взяты на февраль каждого года. В результате была получена динамика стоимости транспортировки сырой нефти наливными танкерами по Северному морскому пути и по Южному морскому пути, представленная на рис. 2.

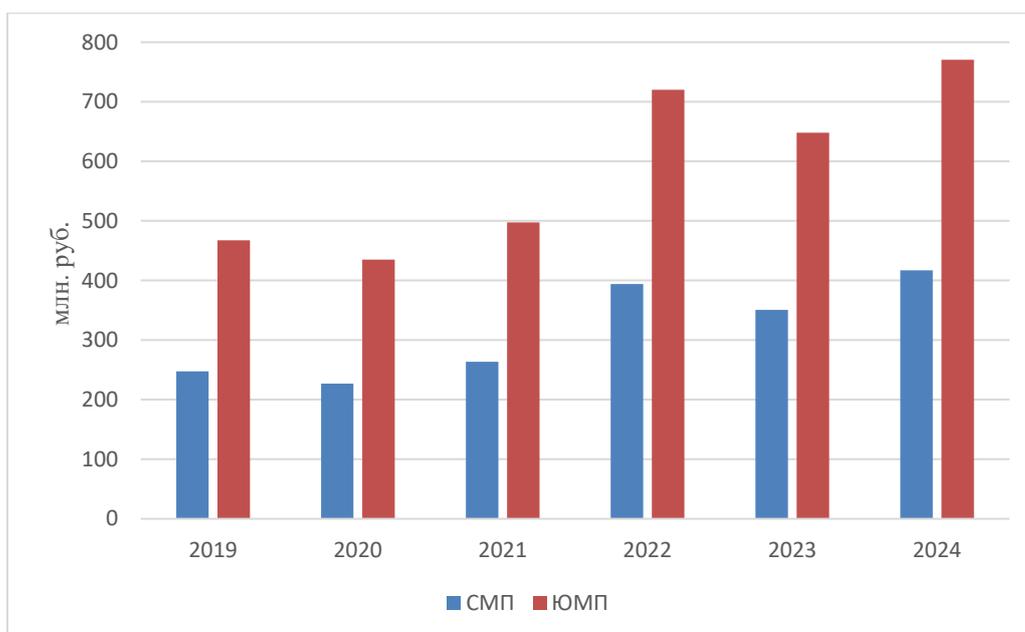


Рис. 2. Динамика стоимости транспортировки нефти  
 Источник: составлено автором по материалам [17,18]

### *Обсуждение*

Исходя из значений, полученных в результате расчётов, можно сделать вывод, что транспортировка сырой нефти по Северному морскому пути обходится дешевле, чем по Южному морскому пути на 353 554 059 руб. Такая разница появляется из-за высоких расходов на бункерное топливо при транспортировке по ЮМП, что обусловлено превосходством южного маршрута по длине, а следовательно и по времени, затрачиваемом на его преодоление. Всё это ведёт к значительному увеличению объёма расходуемого топлива и, следовательно, к увеличению совокупной стоимости бункерного топлива. Что касается разницы в тайм-чартере, то она возникает так же из-за разного количества дней, затрачиваемых на преодоление каждого из маршрутов. Помимо этого, страховые премии за риски при транспортировке нефти по ЮМП оказываются больше, чем при транспортировке по СМП, что связано разным классом танкеров, а также с тем, что проблема пиратства характерна только для южного маршрута. И наконец сборы за прохождение Суэцкого канала также актуальны только для СМП.

В свою очередь рис. 1 демонстрирует экономическую эффективность Северного морского пути в течение всего рассматриваемого периода, при этом явно выраженного тренда на графике не наблюдается.

### *Заключение*

В результате сравнения двух маршрутов транспортировки сырой нефти наливными танкерами из европейской части России в Китай, можно сделать вывод, что Северный морской путь является более экономически выгодным в сравнении с Южным. Таким образом, перенаправлять в Азию высвободившиеся объёмы сырой нефти следует через северный маршрут.

## *Благодарности*

Исследование выполнено за счет проекта ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0013 по программе ФНИ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сафонова Т. Ю. Трансформация рынков сбыта российской нефти с учетом санкционного давления //Управленческое консультирование. – 2023. – №. 1 (169). – С. 51-62.
2. Russia Fossil Tracker. URL: <https://www.russiafossiltracker.com/> (дата обращения:06.11.2023)
3. Korabel. URL: <https://www.korabel.ru/dictionary/detail/1989.html#:~:text=> (дата обращения: 03.04.2024)
4. Argus Нефтетранспорт. Обзор транспортировки нефти и нефтепродуктов. Выпуск XXIV, №1. 2024.
5. Argus Нефтетранспорт. Обзор транспортировки нефти и нефтепродуктов. Выпуск XXIV, №1. 2024.
6. Investing. URL: <https://ru.investing.com/indices/baltic-dirty-tanker> (дата обращения: 23.02.2024)
7. Росморпорт. URL: [https://www.rosmorport.ru/filials/spb\\_portcharges/](https://www.rosmorport.ru/filials/spb_portcharges/) (Дата обращения: 17.02.2024)
8. Абукова Л. А., Дмитриевский А. Н., Мастепанов А. М. Северный морской путь как фактор развития экономической интеграции в Северо-Восточной Азии //Актуальные проблемы нефти и газа. – 2017. – №. 3 (18). – С. 1.
9. Гуранова А. А. Логистические преимущества Северного морского пути //Экономические отношения. – 2019. – Т. 9. – №. 1. – С. 169-176.
10. Ларченко Л. В. и др. Может ли Северный морской путь стать конкурентоспособным международным транзитным путем //Инновации. – 2018. – №. 10 (240). – С. 63-67.
11. Козьменко А. С. Особенности морской транспортировки нефти в восточную Азию //Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2022. – №. 5-2 (137). – С. 28-34.
12. BCS Express. URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/morskoi-put-kak-ustroeny-neftianye-tankery> (дата обращения: 09.02.2024)
13. Neftegaz. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/suda-neftegazovye-i-morskoe-oborudovanie-dlya-bureniya/141625-klassifikatsiya-sudov-po-razmeram/> (дата обращения: 09.02.2024)
14. BCS Express. URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/morskoi-put-kak-ustroeny-neftianye-tankery> (дата обращения: 09.02.2024)
15. Korabel. URL: <https://www.korabel.ru/fleet/info/784.html> (дата обращения: 09.02.2024)
16. Морстройтехнология. URL: <https://morproekt.ru/materialy-po-tekhnologii/prilozheniya-i-spravochnye-materialy/klassifikatsiya-tankerov-v-zavisimosti-ot-dedvejta> (дата обращения: 09.02.2024)
17. Investing. URL: <https://ru.investing.com/currencies/usd-rub> (дата обращения: 07.04.2024)
18. Investing. URL: <https://ru.investing.com/indices/baltic-dirty-tanker> (дата обращения: 07.04.2024)

© М. А. Близневская, И. В. Проворная, 2024

*Т. Т-Ж. Будариев<sup>1</sup>, А. Ю. Новиков<sup>1\*</sup>*

## **Эмпирические показатели ресурсных факторов в моделях экономического роста**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\*e-mail: a.novikov2@g.nsu.ru

**Аннотация.** Модели экономического роста являются важным инструментом анализа и прогнозирования макроэкономических факторов. Современные модели учитывают значительно большее количество экзогенных факторов в сравнении с первоначальными, сосредоточенными на капитальных и трудовых ресурсах. Наряду с техническим прогрессом, институциональным, экологическим и др. факторами также выделяется ресурсный. Наличие природных ресурсов оказывает влияние на экономику через широкий спектр механизмов. При этом теоретическому понятию «ресурсный фактор» соответствует большое количество эмпирических индикаторов. В данной работе выявлены и проанализированы ключевые эмпирические индикаторы ресурсного фактора, включаемые в модели экономического роста. С точки зрения учета полезных ископаемых в модели включаются: доля добывающей промышленности в ВРП или ВВП, доля НДС в общем объеме налогов, доля добывающих отраслей в ОФ, и др. При анализе энергетических ресурсов могут также учитываться общее и душевое потребление первичной энергии, первичное потребление каждого вида топлива, обеспеченность, экспорт и импорт энергоресурсов.

**Ключевые слова:** экономический рост, ресурсные факторы, факторы экономического роста

*T. T-Zh. Budariev<sup>1</sup>, A. Y. Novikov<sup>1\*</sup>*

## **Empirical indicators of resource factors in economic growth models**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk,  
the Russian Federation  
\*e-mail: a.novikov2@g.nsu.ru

**Abstract.** Economic growth models are an important tool for analyzing and forecasting macroeconomic factors. Modern models take into account a significantly larger number of exogenous factors compared to the original ones, which focused on capital and labor resources. Along with technical progress, institutional, environmental and other factors, resource factors are also highlighted. The availability of natural resources influences the economy through a wide range of mechanisms. At the same time, the theoretical concept of “resource factor” corresponds to a large number of empirical indicators. In this work, they were identified and analyzed. key empirical indicators of the resource factor included in economic growth models. From the point of view of accounting for mineral resources, the models include: the share of the extractive industry in GRP or GDP, the share of mineral extraction tax in the total amount of taxes, the share of extractive industries in the public sector, etc. When analyzing energy resources, total and per capita consumption of primary energy, primary consumption can also be taken into account each type of fuel, security, export and import of energy resources.

**Keywords:** economic growth, resource factors, factors of economic growth

## *Введение*

К текущему времени в литературе рассмотрено множество моделей экономического роста. Без исследования причин возникновения и драйверов развития экономического роста, кризисные ситуации становятся ещё более опасными, так как выбор мер по их предотвращению или восстановлению экономики становится затруднительным. Каждая из моделей имеет свои предпосылки и способна рассматривать различные аспекты формирования экономического роста.

Одним из важных вопросов моделирования экономики является выбор факторов, влияющих на её рост. Ещё основоположник экономической науки Адам Смит связывал накопление богатства, как главный показатель роста благосостояния, с факторами труда, капитала и земли. Альфред Маршал, главный неокласик, расширил понимание развития экономики, включив организацию производства, как дополнительный фактор. Но первые теории экономического роста тесно связаны с именем Дж. М. Кейнса, чьи идеи легли в основу макроэкономических моделей роста Е. Домара, Р. Харрода, Н. Калдора и др. Фокус их исследований роста находился на накоплениях и физических факторах – труда и капитала. Именно последователи Кейнса смогли обосновать выбор переменных и сформировали основные принципы построения моделей экономического роста [1]. В дальнейшем же, для более богатого анализа, учёные включали в свои модели другие факторы [2]: технический прогресс [3], институциональный фактор, экологический и ресурсный, а также другие [4, 5].

Все факторы производства на практике выражались в виде первичных в производстве переменных: сырьё, материалы, источники энергии и т. д. Экономический рост связан с растущим конечным потреблением (домохозяйств, энергии и др.), что подтверждается, например, моделью Рамсея – Касса – Купманса [6] и рядом исследований [7, 8]. Составив обзор на выбранные разными авторами эмпирические показатели ресурсных факторов в моделях экономического роста и не только, мы выберем из них наиболее доступные и подходящие под дальнейшее исследование.

### *Эмпирические показатели ресурсных факторов*

В разделе исследований по теме оценки влияния ресурсных факторов существует множество работ, где авторы, выбирая эмпирические показатели ресурсности, проверяют их влияние на экономический рост региона или страны, или определяют с помощью них степень ресурсности региона, чтобы учитывать эту специфику в последующем анализе роста ВРП. Можно выделить три группы факторов для определения ресурсного типа региона в России: фискальный, макроэкономический, отраслевой. В качестве макроэкономического фактора в исследованиях берут долю добывающей промышленности в структуре ВРП или ВВП, она отвечает за уровень развития сектора добычи ископаемых региона. Её исследователи включают в эмпирические модели чаще всего [9,10]. Второй – фискальный показатель – это доля налога на добычу полезных ископаемых (НДПИ) в общем объёме налогов, исходящих из региона или страны. Авторы

объясняют его использование разными специализациями регионов и отличными друг от друга степенями маржинальности сырья, которое в них добывается. Третьим, отраслевым фактором является уровень добычи конкретных полезных ископаемых в ВРП (нефть, газ, уголь и др). Таким образом выделяются ресурсные регионы, чтобы была возможность более чётко определить роль сырьевых отраслей в экономике регионов РФ [11]. Вместе с добычей также целесообразно рассматривать запасы полезных ископаемых для понимания уровня обеспеченности региона ими.

Наряду с другими показателями, в качестве ресурсного может быть взята доля добывающих отраслей в основных фондах региона. В сравнении с вышеперечисленными показателями, расчет на основе основных фондов является более стабильным во времени. Колебания цен на ресурсы могут привести к значительным отклонениям показателей, основанных на доле в ВПР и налогах.

Также различные авторы выявляли положительную корреляцию показателей экономического роста региона и доли занятых в добыче. Данный индикатор примечателен тем, что показывает значимость отрасли в регионе с точки зрения обеспечения занятости населения и выплаты заработных плат. Если большинство людей работает в добывающем секторе, вероятно, что он является одним из самых крупных работодателей в регионе и вносит наибольший вклад в ВРП. Схожий параметр – доля занятых в горнодобывающей промышленности, был выбран в исследовании по Китаю [12].

Наконец, отдельно можно рассмотреть категорию «энергетические ресурсы», играющие важнейшую роль в производственных процессах и жизнедеятельности людей. При производстве товаров и услуг потребляется определенное количество первичной энергии, которое варьируется по отраслям. Тем не менее, без неё производство невозможно. В качестве эмпирического показателя может использоваться общее и подушевое потребление первичной энергии. Также может рассматриваться первичное потребление каждого вида природных ресурсов, что позволяет учитывать эколого-климатические аспекты, в сравнении с совокупным потреблением. Наконец, важную роль играет энергетическая обеспеченность стран. С этой точки зрения берутся показатели обеспеченности энергетическими ресурсами, их экспорт и импорт.

### *Заключение*

В ходе изучения работ множества авторов был выявлен ряд эмпирических показателей, отражающих ресурсные факторы: доли добывающей промышленности, доля занятых в промышленности, доля основных фондов, запасы углеводородов. Они являются наиболее доступными и применимыми в рамках моделирования экономического роста в отношении большинства стран мира. Остальные факторы в основном связаны с выявлением ресурсных регионов и группировкой регионов по типам их ресурсной специализации или по их степени зависимости от природных богатств.

## *Благодарности*

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 23-78-10157.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рудакова, И. Е. Проблемы экономического роста: роль ресурсных и нересурсных факторов / И. Е. Рудакова // *Философия хозяйства*. – 2015. – № 2(98). – С. 169-185.
2. Пономарева Е. А., Божечкова А. В., Кнобель А. Ю. Факторы экономического роста – М.: Издательский дом ДЕЛЮ. – 2012. – 185с.
3. Solow R. A Contribution to the Theory of Economic Growth // *Quarterly Journal of Economy*. – 1956. – P.65-94.
4. Шалаева А. А. Влияние наличия природных ресурсов на экономический рост стран – М.: Мир новой экономики. – 2015. – № 4. – с 41-47.
5. Gelb A. H. Oil Windfalls: Blessing or Curse? - New York, World Bank: Oxford University Press. –1988. – 357 p.
6. Козко А. И. и др. Об идеальной экономической ситуации - росте капитала и функции потребления в некоторых моделях экономического роста /А. И. Козко, Л. М. Лужина, А. Ю. Попов, В. Г. Чирский// *Чебышевский сборник*. – 2023. – Т. 24, № 2(88). – С. 256-265.
7. Рева А. Р. Связь между потреблением энергии и ВВП. Эластичность потребления первичной энергии в Индии // *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. – 2019. – Т. 9. – №. 4-1. – С. 371-383.
8. Кремков М. В., Воронин С. А. Динамика потребления энергии и угля и ее связь с состоянием мировой экономики и финансово-экономическими кризисами // *Уголь*. – 2009. – №. 11. – С. 18-23.
9. Белан А. К., Шмат В. В. Анализ влияния ресурсных и нересурсных факторов на рост экономики Томской области с применением когнитивного подхода // *Мир экономики и управления*. – 2015. – Т. 15. – №. 1. – С. 78-93.
10. Михеева Н. Н. Двухсекторная модель развития ресурсодобывающих регионов // *Регион: экономика и социология*. 2009. №2. С. 23-42.
11. Комарова А. В. Обоснование выбора факторов определения ресурсных регионов // *Экономика Сибири в условиях глобальных вызовов XXI века: Сборник статей в 6-ти томах*. - 2018. - Т. 2. 169 с.
12. Xiangyan Qian, Di Wang, Jia Wang, Sai Chen, Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China // *Resources Policy*. – 2019.

© Т. Т-Ж. Будариев, А. Ю. Новиков, 2024

*В. А. Вахнова<sup>1</sup>, И. В. Проворная<sup>1\*</sup>*

## **Оценка развитости рынка газомоторного топлива в России**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,

Российская Федерация

\* e-mail: provornayaiv@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассчитан процент достижения целевых показателей: объем потребления природного газа в качестве моторного топлива; количество стационарных объектов заправки природным газом; количество транспортных средств, использующих природный газ в качестве моторного топлива по субъектам Российской Федерации, установленных в государственной программе «Развитие энергетики», утвержденной в 2014 году. Показано, что природный газ является перспективным видом топлива в России, и что некоторые регионы уже обеспечены достаточной инфраструктурой для их использования. Также в работе проведена оценка эффективности мер государственной поддержки в различных регионах, проанализированы новые проекты в направлении развития рынка газомоторного топлива, как в отдельных субъектах, так и в стране в целом.

**Ключевые слова:** природный газ, альтернативное топливо, инфраструктура ГМТ, государственная поддержка

*V. A. Vakhnova<sup>1</sup>, I. V. Provornaya<sup>1\*</sup>*

## **Assessment of the development of the gas engine fuel market in Russia**

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk,  
the Russian Federation

\* e-mail: provornayaiv@gmail.com

**Abstract.** The article calculates the percentage of achieving the targets: the volume of consumption of natural gas as motor fuel; the number of stationary natural gas refueling facilities; the number of vehicles using natural gas as motor fuel in the subjects of the Russian Federation, established in the state program "Energy Development", approved in 2014. It is shown that natural gas is a promising type of fuel in our country and that some regions are already provided with sufficient infrastructure for their use. The work also assessed the effectiveness of state support measures in various regions, analyzed new projects in the direction of developing the gas engine fuel market, both in individual subjects and in the country as a whole.

**Keywords:** natural gas, alternative fuels, gas fuel infrastructure, government support

### ***Введение***

Во всем мире прослеживается тенденция перехода на альтернативное топливо. Газомоторное топливо – топливо, основанное не на нефтепродуктах, а на природном газе – имеет ряд преимуществ: экономичное, экологичное, безопасное [1]. В качестве газомоторного топлива большое распространение получили сжиженный природный газ (СПГ) и компримированный природный газ (КПГ),

сжиженный углеводородный газ (СУГ) [2]. Данные разновидности природного газа отличаются по физическим свойствам, способам транспортировки и применения. СУГ представляет собой смесь пропана и бутана и является нефтепродуктом, при определенной концентрации в воздухе взрывоопасен. Несмотря на то, что данный вид топлива дешевле и безопаснее для окружающей среды, чем бензин и дизель, в рамках государственной программы «Развитие энергетики» он не рассматривается, поэтому в данной работе его влияние на состояние рынка ГМТ не учитывается. Природный газ (метан) – это смесь газов, образовавшихся в недрах Земли при разложении органических веществ. Стоимость такого вида топлива в среднем на 50% ниже стоимости бензина. Перевод транспорта на природный газ позволяет увеличить срок его эксплуатации и снизить расходы на техническое обслуживание. Выбросы углекислого газа при использовании газа в качестве топлива меньше в 2-3 раза, по сравнению с выбросами от использования нефтепродуктов. При этом количество азотных соединений, выбрасываемых в атмосферу, сокращается на 90% по сравнению с дизельными автомобилями. Выхлопы от газового транспорта не содержат сажи или сернистых соединений, что приводит к 9-кратному уменьшению задымления и загрязнения окружающего воздуха. Газ почти в два раза легче воздуха, поэтому при разгерметизации оборудования он сразу улетучивается. МЧС России классифицирует метан в самый безопасный класс горючих веществ по степени чувствительности.

Россия является мировым лидером по запасам природного газа, таким образом, большая протяжённость дорог дает преимущество именно газомоторному топливу (ГМТ). Следовательно, политика государства направлена на увеличение потребления природного газа внутри страны вследствие развития инфраструктуры для ГМТ [3]. Минэнерго совместно с ПАО «Газпром» и ПАО «Новатэк» работает над созданием обновленной концепции «Модель ускоренного развития ГМТ отрасли до 2035 года». Программа развития ГМТ разделена на три этапа: до 2025 года планируется полностью сформировать нормативно-правовую базу, до 2030 года – построить основную инфраструктуру вдоль дорожной сети, а на 2030–2035 годы запланировано основное наращивание потребления природного газа в качестве моторного топлива и общее увеличение парка газомоторного транспорта. Итогом реализации программы станет развитый рынок экологичного и экономически эффективного топлива.

Рынок газомоторного топлива находится только на первом этапе своего развития, который, согласно программе «Развития энергетики», завершится к концу 2024 года. Исходя из анализа видно, что регионы достигают поставленных Правительством задач. Конечно, это происходит благодаря совместным усилиям федеральных и региональных властей, а также крупных газовых компаний. Ярким примером сотрудничества является проект «Мега вызов», который реализует «Газпром газомоторное топливо» для всех коллективов газозаправочных станций по стране. Проект представляет собой конкурс среди АГНКС, целью проекта является расширение использования метана как моторного топлива. В 2023 году Свердловская заправочная станция АГНКС-4 одержала победу в данном конкурсе, за месяц ей удалось реализовать 700 тысяч кубометров КПП. В данной

работе успехи Свердловской области подтверждаются структурой автопарка, доля транспортных средств на газомоторном топливе уже на конец 2022 года превосходила другие регионы. В 2024 году лучшей стала АГНКС-3 в Санкт-Петербурге, реализация метана за конкурсный месяц составила более 700 тысяч кубометров, как и в Свердловской области потребление обеспечивается городским общественным транспортом, но с 2023 года таксопарки Санкт-Петербурга также подключились к газовым заправкам. Также с августа 2023 года награды в «Мега вызове» получили Владимирская и Сахалинская области.

Цель работы – оценка уровня развития рынка газомоторного топлива в регионах России.

Для достижения цели в ходе исследования поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть структуру пользования по видам транспорта, а также состояние автопарка на ГМТ в Российской Федерации;
2. Провести оценку уровня развития рынка ГМТ в регионах России;
3. Исследовать эффективность государственных мер в рассматриваемых регионах.

### ***Методы и материалы***

Для анализа было выбрано 15 регионов, основным критерием выбора было количество заправочных станций (АГНКС) на 2024 год и плотность их расположения на территории субъекта. Так как на данный момент официальная отчетность за 2023 год не опубликована, то воспользовались самой актуальной из доступной информацией. Также в качестве критериев были рассмотрены доступность заправки сжиженным природным газом, то есть наличие криоАЗС или АГНКС с криогенным оборудованием в регионе, и эффективность инфраструктуры ГМТ прошлых лет (по отчетам Газпрома).

На основе отчетов Минэнерго РФ, были получены плановые и фактические показатели по регионам, которые позволили проанализировать работу регионов в направлении развития газомоторного топлива.

### ***Результаты и обсуждение***

Первичный анализ регионов позволил выявить 9 субъектов, имеющих наиболее высокую плотность расположения газовых заправочных станций. Далее к ним добавились субъекты, имеющие станции с возможностью заправки СПГ, всего их 18 в стране. В анализ включены Челябинская область – лидер по количеству таких заправочных станций, а также Санкт-Петербург и Татарстан, которые входят в число первых девяти рассмотренных субъектов. Таким образом на первом этапе было выделено 10 субъектов, предположительно являющихся лидерами по развитию ГМТ рынка в России. Однако крупная нефтегазовая компания «Газпром» по итогам 2022 года представила свой рейтинг регионов по уровню развития рынка газомоторного топлива, в котором первая десятка имела другой состав [4]. Следовательно, в данной работе к рассмотрению добавилось еще 5 субъектов, на которые, по мнению аналитиков «Газпрома», стоит обратить внимание. Так, в табл. 1 представлены все выбранные регионы. На первом этапе

был сформирован список анализируемых регионов в порядке от наибольшего количества заправочных природным газом станций к наименьшему на 2024 год.

Таблица 1

Выборка субъектов РФ по результатам первичного анализа

Субъект	Кол-во заправочных природным газом	Плотность	Крио АЗС	Топ 10 рейтинга Газпром
Ростовская область	58	0,0006	нет	да
Республика Татарстан (Татарстан)	48	0,0007	есть	да
Белгородская область	46	0,0017	нет	да
Республика Башкортостан	40	0,0003	есть	да
Воронежская область	35	0,0007	нет	нет
Краснодарский край	34	0,0005	нет	да
Ставропольский край	28	0,0004	нет	да
Челябинская область	28	0,0003	есть	нет
Санкт-Петербург	19	<b>0,0132</b>	есть	да
Владимирская область	18	0,0006	есть	нет
Сахалинская область	18	0,0002	нет	да
Свердловская область	18	0,0001	есть	да
Москва	14	0,0055	нет	нет
Калининградская область	12	0,0008	есть	нет
Кемеровская область	12	0,0001	нет	да

Источник: составлено автором на основе данных Национальной газомоторной ассоциации [5]

Первое место по абсолютному значению количества заправочных станций занимает Ростовская область (2 место в рейтинге Газпром), при этом по частоте размещения таких станций лидирует Санкт-Петербург (1 место в рейтинге Газпром). Отметим, что в большинстве регионов на 100 км нет даже одной АГНКС, это является сдерживающим фактором для развития рынка газомоторного топлива.

На втором этапе проанализированы результаты деятельности регионов в направлении развития инфраструктуры ГМТ. По показателю «количество стационарных газовых заправок в субъектах РФ» на 2021 год итоги отражены в табл. 2, а в табл. 3 представлены итоги по этому же показателю уже на апрель 2024 года.

Таблица 2

## Количество стационарных заправочных станций по итогам 2021 года

Субъект	План	Факт	Процент выполнения	Процент от общего количества по стране
Челябинская область	5	24	480%	3%
Республика Башкортостан	27	41	152%	5%
Сахалинская область	2	3	150%	0,36%
Воронежская область	18	22	122%	3%
Республика Татарстан	32	37	116%	4%
Свердловская область	19	20	105%	2%
Белгородская область	38	39	103%	5%
Кемеровская область	12	11	92%	1%
Ставропольский край	33	27	82%	3%
Владимирская область	12	9	75%	1%
Краснодарский край	34	25	74%	3%
Ростовская область	56	41	73%	5%
Санкт-Петербург	23	16	70%	2%
Москва	25	14	56%	2%
Калининградская область	9	5	56%	1%

Источник: составлено автором на основе Отчета о ходе реализации государственной программы «Развитие энергетики» [6]

Таблица 3

## Количество стационарных заправочных станций на 2024 год

Субъект	План	Факт	Процент выполнения
Сахалинская область	5	18	360%
Воронежская область	21	35	167%
Белгородская область	38	46	121%
Челябинская область	31	36	116%
Республика Татарстан	50	54	108%
Республика Башкортостан	47	42	89%
Кемеровская область	14	12	86%
Владимирская область	30	20	67%
Ростовская область	89	58	65%
Ставропольский край	43	28	65%
Калининградская область	24	14	58%
Краснодарский край	71	36	51%
Санкт-Петербург	50	25	50%
Свердловская область	37	18	49%
Москва	63	14	22%

Источник: составлено автором на основе «Государственной программы Российской Федерации "Развитие энергетики" [7]

Так, на конец 2021 года Челябинская область показала лучший результат по выполнению плана, утвержденному программой «Развитие энергетики», более того еще 6 субъектов перевыполнили план. Очевидно, что 2021 год был трудным для всех экономических сфер из-за пандемии, поэтому неудачи представленных регионов не так значимы для анализа, как успех первых семи регионов. Например, Челябинская область в 2019 году вошла в число пилотных проектов по развитию ГМТ, около 1 млрд руб. выделено из федерального бюджета на развитие рынка по двум направлениям: инфраструктура газозаправочных станций и переоборудование транспортных средств.

Положение регионов значительно изменилось за прошедший период, наиболее эффективной в направлении обеспечения инфраструктуры стала Сахалинская область. Государство уделяет большое внимание Сахалинской области и ее углеродной нейтральности, благодаря чему именно на этой территории реализуются проекты по развитию альтернативных видов топлива. Помимо федеральной программы, в регионе работают собственные меры поддержки (табл. 4).

Таблица 4

Региональные меры поддержки развития рынка ГМТ в Сахалинской области

	Физлица	Предприятия	Инвесторы
Поддержка	50% скидка на транспортный налог; 100% компенсация стоимости переоборудования (не более 150 тыс. руб. на 1 ТС); Компенсация части первоначального взноса по автокредитам на ТС на метане;	50% скидка на транспортный налог; 90% компенсация на закупку новых ТС и переоборудование для агро-отрасли; 70% компенсация на переоборудования для всех предприятий (не более 150 тыс. руб. на 1 ТС) Пониженная ставка по автолизингу – 5%.	Предоставление земельного участка без процедуры торгов; 90% компенсация приобретения ПАГЗ (без учета НДС); 70% компенсация стоимости оборудования АГНКС; Прямые закупки ПАГЗ в муниципалитетах, где нет инвесторов; Компенсация стоимости технического оборудования для сервисных центров по переоборудованию.

Источник: составлено автором на основе данных Национальной газомоторной ассоциации

Таким образом, как федеральная, так и региональная поддержка в течение рассматриваемого периода (2021-2024) направлена на стимулирование спроса через скидки на транспортный налог и компенсацию переоборудования транспортных средств, а также стимулирование предложения этими же способами.

Подтверждение тому - Сахалинская и Челябинская области. Данные меры существуют и в других регионах. Более того, 8 из представленных субъектов попали в программу субсидирования переоборудования с 2023 года. Отличия в правилах субсидирования и размерах налоговой скидки формируют различия в уровне развития инфраструктуры в целом.

Третий этап – анализ структуры автопарка субъектов РФ, на нем выяснилось, что регионы прежде всего переводят на природный газ общественный транспорт. Это позволяет сократить расходную часть бюджета на топливо и техническое обслуживание транспорта. В табл. 5 продемонстрирована структура автопарка в регионах на 2022 год, без учета грузовых автомобилей. Так, доля легковых автомобилей на ГМТ в большинстве регионов не достигает 1%. По данным Росстата Владимирская область, Воронежская область и Москва смогли увеличить данный показатель за 2022 год по сравнению с 2021. Также отметим, что Калининградская область, Краснодарский край и Республика Башкортостан увеличили долю не только общественного транспорта на природном газе, но и легкового транспорта.

Таблица 5

Наличие автотранспортных средств по Российской Федерации, на конец 2022 года, единиц

	Легковые автомобили			Автобусы		
	Всего	на природном газе	доля ТС на ГМТ	Всего	на природном газе	доля ТС на ГМТ
Белгородская область	533023	2630	0,0049	7314	850	<b>0,1162</b>
Владимирская область	432599	8005	<b>0,0185</b>	5057	997	<b>0,1972</b>
Воронежская область	867436	618	0,0007	11342	237	<b>0,0209</b>
Москва	4137476	7408	0,0018	44613	1458	<b>0,0327</b>
Калининградская область	447711	1242	0,0028	4984	132	<b>0,0265</b>
Санкт-Петербург	1789182	3348	0,0019	20599	1568	<b>0,0761</b>
Краснодарский край	1857106	226	0,0001	25996	208	0,0080
Ростовская область	1459944	21009	<b>0,0144</b>	21689	1629	<b>0,0751</b>
Республика Башкортостан	1 653 486	1 327	0,0008	21 918	148	0,0068
Ставропольский край	784617	3392	0,0043	12244	1893	<b>0,1546</b>
Республика Татарстан	1204227	3208	0,0027	17552	687	<b>0,0391</b>
Свердловская область	1981118	359515	<b>0,1815</b>	26604	5298	<b>0,1991</b>
Челябинская область	1325458	443	0,0003	22402	283	<b>0,0126</b>
Кемеровская область - Кузбасс	885520	617	0,0007	12235	558	<b>0,0456</b>
Сахалинская область	172982	23	0,0001	3574	46	<b>0,0129</b>
другие	31076953	525657		575737	50647	
<b>Российская Федерация</b>	<b>50608838</b>	<b>938668</b>	0,0185	<b>833860</b>	<b>66639</b>	<b>0,0799</b>

Источник: составлена автором по данным Росстат

На заключительном этапе анализа рассмотрены объемы реализации метана в качестве моторного топлива. Пока что, автопарк на ГМТ развит слабо, но при этом все равно удается наращивать мощности заправочных станций и реализовывать все большие объемы природного газа. В табл. 6 отражены результаты деятельности регионов по достижению целевых показателей по программе «Развитие энергетики» в 2022 году.

Таблица 6

Объем потребления природного газа в качестве моторного топлива, на конец 2022 года, млрд м<sup>3</sup>

Субъект	План	Факт	Процент выполнения
Сахалинская область	0,004	0,0156	390%
Калининградская область	0,019	0,0615	324%
Кемеровская область-Кузбасс	0,029	0,0563	194%
Свердловская область	0,053	0,0868	164%
Воронежская область	0,024	0,0391	163%
Санкт-Петербург	0,059	0,0671	114%
Республика Татарстан	0,076	0,0841	111%
Белгородская область	0,049	0,0465	95%
Челябинская область	0,032	0,0287	90%
Владимирская область	0,027	0,0241	89%
Ставропольский край	0,081	0,0649	80%
Республика Башкортостан	0,069	0,0533	77%
Краснодарский край	0,106	0,0792	75%
Ростовская область	0,146	0,1056	72%
Москва	0,048	0,0275	57%
<b>Российская Федерация</b>	<b>0,559</b>	<b>0,853</b>	<b>153%</b>

Источник: составлена автором на основе «Государственной программы Российской Федерации "Развитие энергетики"»

### Заключение

Итак, объем реализации зависит как от количества транспортных средств, так и от количества заправочных станций. С точки зрения выполнения планов Сахалинская область опережает другие регионы, это можно объяснить стремлением региональных властей к углеродной независимости и их тесным сотрудничеством с «Газпром газомоторное топливо». По результатам анализа видно, как за небольшой промежуток времени возросло количество заправочных станций (табл. 2 и 3) и, соответственно, объемы реализации (табл. 6). Свердловская область также показывает хороший результат по выполнению плана, но в этом случае потребление метана нарастает за счет относительно большей доли транспорта на природном газе, как общественного, так и легкового (табл. 5). Признанные лидеры Санкт-Петербург и Республика Татарстан также перевыполняют планы, но с меньшим процентом. Дело в том, что субъекты раньше других

начали развивать газомоторное топливо и поэтому целевые показатели для них завышены с расчетом на прошлые успехи. Южные регионы (Ростовская область, Краснодарский край, Ставропольский край) также успешно развивают рынок газомоторного топлива, но на 2022 год выполнить планы по программе «Развитие энергетики» не удалось. Данный пример объясняется проведением СВО и перераспределением мер поддержки в другие сферы.

В статье показано, что на данном этапе развития рынка ГМТ в целом по стране получается выполнять поставленные задачи. В последние годы большое внимание уделяется общественному транспорту, так как использование газа на нем не только снижает количество выбросов в атмосферу, но и позволяет снизить расходы на обслуживание этого транспорта. Также в отдельных регионах практикуется субсидирование на переоборудование личного транспорта физлиц, чтобы повысить спрос на природный газ в качестве топлива. Налоговые скидки также являются одной из мер поддержки, но эффективность этой меры трудноизмерима, потому что налоговые институты в регионах работают по-разному, единых правил пока что не установлено. Однако к 2025 году нормативно-правовая база должна быть полностью сформирована.

### *Благодарности*

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-18-00424, <https://rscf.ru/project/22-18-00424/>.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федоров А. И. Экономическая эффективность перехода на газомоторное топливо автомобильного транспорта // МЦНП «Новая наука». 2021. С. 60-64.
2. Аналитическая справка: «Виды газомоторного топлива» / Национальная газомоторная ассоциация: официальный сайт. URL: <https://ngvrus.ru/file/info/library/sravnitelnaya-spravka-prirodnogo-gaza-i-sug.pdf> (дата обращения: 12.02.2024).
3. Газомоторное топливо — модель ускоренного развития / Центральное диспетчерское управление ТЭК. – 2023. URL: [https://www.cdu.ru/tek\\_russia/issue/2023/10/1193/](https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2023/10/1193/) (дата обращения: 12.02.2024).
4. Рейтинг регионов России по уровню развития рынка газомоторного топлива. URL: <https://gmt.gazprom.ru/d/textpage/73/115/prezentatsiya-reiting-regionov-2022.pdf> (дата обращения 13.04.2024).
5. Годовой отчет 2021 / Национальная газомоторная ассоциация: официальный сайт. URL: <https://ngvrus.ru/ngv-forum.html> (дата обращения: 12.02.2024).
6. Отчет о ходе реализации государственной программы «Развитие энергетики». 2022. URL: <https://minenergo.gov.ru/activity/government-program> (дата обращения 13.04.2024).
7. Государственная программа Российской Федерации "Развитие энергетики". 2014. URL: <https://minenergo.gov.ru/activity/government-program> (дата обращения 13.04.2024).

© В. А. Вахнова, И. В. Проворная, 2024

*К. Д. Гладких<sup>1,2\*</sup>, И. В. Проворная<sup>1,2</sup>*

## **Теоретико-методологические основы управления региональными социально-экономическими системами**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\*e-mail: kristinagladkih2@gmail.com

**Аннотация.** Целью исследования является сравнительный анализ теоретических и методических основ управления региональными социально-экономическими системами. Авторами показано отсутствие единого подхода к определению региональных социально-экономических систем, выявлено различие между понятиями «регион» и «региональная социально-экономическая система». В работе была обоснована важность управления региональными социально-экономическими системами, а также были выявлены факторы, в наибольшей мере влияющие на него. Наряду с этим были проанализированы методы и подходы, используемые при оценке эффективности территориальных образований. Было обнаружено, что большую роль при оценке уровня эффективности управления оказывает такой фактор, как надежность энергоснабжения, особенно сильно отражающий дифференциацию субъектов в Российской Федерации. Это связано с тем, что такие факторы, как качество жизни, перспективы развития производства и всех сфер жизнедеятельности, напрямую связаны с параметрами энергообеспеченности.

**Ключевые слова:** региональная социально-экономическая система, надежность энергоснабжения, управление региональными социально-экономическими системами, регион

*K. D. Gladkikh<sup>1,2\*</sup>, I. V. Provornaya<sup>1,2</sup>*

## **Theoretical and methodological foundations of the management of regional socio-economic systems**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS  
\*e-mail: kristinagladkih2@gmail.com

**Abstract.** The purpose of the study is a comparative analysis of the theoretical and methodological foundations of the management of regional socio-economic systems. The authors show the lack of a unified approach to the definition of regional socio-economic systems, the difference between the concepts of "region" and "regional socio-economic system" is revealed. The paper justified the importance of managing regional socio-economic systems, and also identified the factors that most affect it. Along with this, the methods and approaches used in assessing the effectiveness of territorial entities were analyzed. It was found that an important role in assessing the level of management efficiency is played by such a factor as the reliability of energy supply, which especially strongly reflects the differentiation of subjects in the Russian Federation. This is due to the fact that factors such as quality of life, prospects for the development of production and all spheres of life are directly related to the parameters of energy supply.

**Keywords:** regional socio-economic system, reliability of energy supply, management of regional socio-economic systems, region

## Введение

В современном мире для стран с обширной территорией характерна высокая дифференциация факторов, что отражается на состоянии региональных систем. Именно из-за этого развитию отдельных региональных образований в стране в последнее время уделяется все больше внимания.

Благодаря усилиям многих исследователей, на данный момент существует масса трактовок понятия «регион» и «региональная экономическая система». Данные определения рассматривают с точки зрения территориально-географического, социального, комплексного и системного подходов [1]. Каждый из авторов закладывает в понятие свой смысл, что приводит к отсутствию единого теоретического подхода к определению понятий.

Понятие «регион» и «региональная экономическая система» отождествляется частью исследователей. Ряд авторов говорят об отличиях понятий [2] (рис. 1).

<p>Ерохина. Е. А.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Совокупность объектов и процессов, называемых компонентами, взаимосвязанных и взаимодействующих между собой, которые образуют единое целое, обладающее свойствами, не присущими составляющим его компонентам, взятым в отдельности [11]</li></ul>	<p>Крымов В. Б.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Соотносимая с определенной территорией субъекта федерации совокупность субъектов и объектов управления, образованная посредством прямых и обратных социальных и экономических связей между ними, обусловленных наличием и реализацией взаимодействующих формальных и (или) неформальных институтов [12]</li></ul>	<p>Гаврилов А. И.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Система, включающая в себя совокупность ресурсов и экономических субъектов, взаимосвязанных и взаимодействующих между собой в сфере производства, распределения обмена и потребления, образующих единую целостную социально-экономическую структуру в рамках определенной территории [13]</li></ul>
<p>Башнянин Г. И.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Совокупность всех видов экономической деятельности людей (механизмов, институтов функционирования, регулирования национальной экономики) в процессе производства, обмена, распределения и потребления товаров и услуг, а также в процессе регулирования такой деятельности [14]</li></ul>	<p>Мироедов А. А.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Относительно автономная локальная и целостная территориальная система совместного производства, труда и развития населения, функционирование которой нацелено на создание необходимых условий для воспроизводства ресурсного и человеческого капитала на основе повышения эффективности производства, его территориальной специализации и кооперации, рационального использования ресурсов, рыночных отношений, различных форм собственности [15]</li></ul>	<p>Смирнов В. В.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Система, в которой участвующие элементы со своими структурами, функциями, связями с внешней средой образуют эмерджентную организацию на основе синергетических связей и состоит из функционально дополняющих подсистем: ресурсной, производственной, рыночной, инвестиционной, социальной, институциональной, культурной и организационной [16]</li></ul>
<p>Атанов Н.И.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Сообщество элементов и подсистем, объединенных функциональными горизонтальными связями [17]</li></ul>		

Рис. 1. Подходы к определению «региональная социально-экономическая система»

На основе анализа определений, выдвигаемых исследователями, Викторова Н. Г. сделала вывод о том, что термин «региональная экономическая система» должен включать следующие компоненты: системную связанность компонент, территориальную обособленность совокупности компонент, синергетический характер результата взаимодействия компонент, институциональный характер взаимодействия компонент.

В своей работе Карпенко П. А. пришел к выводу о том, что корректное понятие региональной экономической системы можно представить в таком виде: общественно признанная территориально ограниченная целостная совокупность системно связанных субъектов и ресурсов, объединенных в институты, взаимодействующих в рамках синергии производства и обмена товаров, работ, услуг и обладающих единой системой регулирования [3].

### ***Управление региональными социально-экономическими системами***

В условиях современной экономики важно предпринимать и реализовать ряд мер, которые помогут достичь стабильного развития общества, а также обеспечить социально-экономическое развитие страны и её регионов.

Для достижения устойчивости особое внимание стоит обращать на управление социально-экономическим развитием регионов. Под управлением развитием региона принято понимать процесс изменения социально-экономической системы, направленный на повышение благосостояния населения, обеспечивающий устойчивость системы в настоящем и будущем, способствующий усилению конкурентоспособности региона [4].

При управлении развитием части государства важно принимать во внимание совокупность климатических, географических, социально-экономических и иных особенностей региональных образований.

Реализация управления социально-экономическим развитием происходит при использовании совокупности программ и методов, зачастую закрепленных на законодательном уровне. Так, например, в нашей стране для данных целей создаются стратегии, позволяющие достичь необходимый уровень социально-экономического развития.

В качестве инструментов, применяемых государственными органами, можно выделить создание особых экономических зон, осуществление системных трансфертов, проведение федерального финансирования, пересмотр льгот для жителей и др. [5]

Важно заметить, что на создание системы управления в региональных образованиях оказывают значительное влияние такие факторы, как уровень хозяйственной развитости, уровень развития конкурентной среды, инфраструктуры среды и др. [6]

Помимо вышеперечисленных факторов, большую роль при управлении региональными социально-экономическими системами играет наличие взаимосвязи между потреблением, производством энергии и экономическим ростом, что отражается на уровне надежности энергоснабжения [7]. Более того, для Российской Федерации характерно наличие большого запаса энергетических ресур-

сов и низкий уровень развития инфраструктуры, непосредственно связанной с энергоснабжением, что особенно сильно указывает на неравномерность развития субъектов РФ [8]. Именно поэтому при управлении региональными социально-экономическими системами особое внимание следует уделять такому фактору, как надежность энергоснабжения.

### *Методы и материалы*

Эффективность управления региональной социально-экономической системой может быть рассмотрена с разных аспектов. В настоящее время для оценки эффективности системы регионального управления наиболее часто авторами используется индикативный, критериальный и комплексный подходы [9]. В ходе применения перечисленных методов многие исследователи обращают внимание на такой важный параметр, как надежность энергоснабжения населения и промышленности. При анализе технических особенностей под надежным энергоснабжением понимают способность бесперебойного обеспечения потребителей необходимой мощностью и энергией определенных качественных параметров. Однако, важно заметить, что, в первую очередь, энергия – экономическое благо. Без потребления энергии невозможно производство других экономических благ и удовлетворение большинства человеческих потребностей. Для потребителя в первую очередь важны вопросы надежности снабжения энергией. Именно поэтому качество жизни, перспективы развития производства и всех сфер жизнедеятельности напрямую связаны с параметрами энергообеспеченности, такими как достаточность энергии в текущем потреблении, себестоимость производства и преобразования энергии, объем и структура производственных мощностей по генерации и передаче энергии, характеристики энергоемкости и др. Усиление внимания ученых к вопросам энергетики и энергетической безопасности в данном контексте является вполне обоснованным [10].

Наиболее часто при анализе уровня развития региональных социально-экономических систем авторы используют кластерный метод, являющийся одним из самых совершенных методов многомерной классификации. Именно данный метод позволяет сравнить группы регионов по совокупности отобранных ранее показателей и наглядно отобразить разницу в уровне развития территориальных образований.

### *Результаты и обсуждение*

Высокая дифференциация уровня развития региональных социально-экономических систем оказывает сильное воздействие на уровень развития государства в целом. Именно поэтому важно понимать, что имеется в виду под региональными социально-экономическими системами, что представляет собой управление региональными социально-экономическими системами, какие инструменты, методы применяются при управлении и какие факторы в наибольшей мере влияют на создание системы управления территориальными образованиями.

В ходе работы авторами было выявлено, что на данный момент не существует единого подхода к понятию «региональная социально-экономическая си-

стема». Одни авторы отождествляют это понятие с регионом, другие авторы выделяют ряд дополнительных важных свойств, присущих региональным системам. При обзоре литературы было выявлено, что определение региональных социально-экономических систем несколько шире, чем понятие «регион», и включает в себя ряд других важных факторов.

При анализе работ отечественных и зарубежных исследователей было выявлено, что для достижения устойчивости роста благосостояния населения необходима реализация ряда мер, которые часто закрепляются на законодательном уровне. Совокупность этих мер составляет управление региональными социально-экономическими системами.

Для анализа эффективности управления региональными социально-экономическими системами авторы используют индикативный, критериальный и комплексный подходы, особое внимание уделяя такому фактору, как надежность энергоснабжения. Именно данный фактор сильно отражает значительную дифференциацию территориальных образований в уровне социально-экономического развития.

### ***Заключение***

Таким образом, при проведении сравнительного анализа теоретических и методических основ управления региональными социально-экономическими системами авторами показано отсутствие единого подхода к определению региональных социально-экономических систем, выявлено наличие существенных различий между понятиями «регион» и «региональная социально-экономическая система». Авторы выяснили, что особую значимость имеет управление региональными социально-экономическими системами, грамотная реализация которого может привести к повышению уровня развития всего государства. Особое внимание было уделено особенностям управления региональных экономических систем в Российской Федерации, где особое внимание следует уделять такому фактору, как надежность энергоснабжения.

### ***Благодарности***

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-78-10156, <https://rscf.ru/project/23-78-10156/>.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Паздникова Н. П. Онтология исследования региональных социально-экономических систем // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. – 2016. – №. 2 (19). – С. 70-78.
2. Дамдинова Ч. Б. Подходы к определению категории "Региональные социально-экономические системы" // Вестник Бурятского государственного университета. – 2009. – №. 2. – С. 32-37.
3. Викторова Н. Г., Карпенко П. А. Генезис понятия «Региональная социально-экономическая система» // Естественно-гуманитарные исследования. – 2021. – №. 4 (36). – С. 92-96.
4. Панкратов П. А. Управление региональными социально-экономическими системами // Экономическая безопасность: правовые, экономические, экологические аспекты. – 2017. – С. 272-278.

5. Балакина Г. Ф. Инструменты регулирования социально-экономического развития регионов //Региональная экономика: теория и практика. – 2014. – №. 39. – С. 2-12.
6. Северина Ю. Н., Савченко Т. В. Управление социально-экономическими системами: сущность и специфика организации //Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – №. 3. – С. 167-178.
7. Васильева Ю. П., Салихова Р. Х. Рынок нефти и экономический рост в России //Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14. – №. 2. – С. 217-225.
8. Змиева К. А. Проблемы энергоснабжения арктических регионов //Российская Арктика. – 2020. – №. 1. – С. 5-14.
9. Скопина И. В., Скопин О. В. Индикативный, критериальный и комплексный подходы к оценке эффективности системы регионального управления //Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2010. – №. 22. – С. 155-167.
10. Мошин А. Ю. Экономическая сущность надежности электроснабжения потребителей //Вестник Университета Российской академии образования. – 2008. – №. 2. – С. 74-77.
11. Ерохина Е. А. Теория экономического развития: системно-синергетический подход / Е.А. Ерохина. – Томск: Изд-во Томского ун-та. – 1999. – 160 с.
12. Крымов В. Б. Инновационная экономика-стратегический курс развития регионов //М.: Экономика. – 2012.
13. Гаврилов А. И. Региональная экономика и управление: учеб. пособие для вузов / А.И. Гаврилов. – М.: ЮНИТИ. – 2002.
14. Башнянин Г. И. Регулирование экономических систем и ее типы / Г. И. Башнянин// Научный вестник. – 2007. –№ 17. – С. 135–142.
15. Miroedov A. A., Chub A. A. The Statistical factors for estimation level of development of regional social-economic system //Questions of the Statistics. 2007. – №9. – P. 80-83.
16. Смирнов В. В. Повышение социально-экономического развития региона: теория, оценка, интеграционный вектор / В.В. Смирнов //Региональная экономика: теория и практика. – 2007. – №10. – С. 19-22.
17. Атанов Н. И. Экономическая система: особенности функционирования / Н. И. Атанов, А. А. Лапинкас. – Улан-Удэ: БГУ. – 1998. – 116 с.

© К. Д. Гладких, И. В. Проворная, 2024

*А. О. Киселёв<sup>1</sup>, А. Ю. Новиков<sup>1\*</sup>*

## **Основные факторы, используемые в гравитационных моделях для анализа мировых торговых потоков**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\*e-mail: a.novikov2@g.nsu.ru

**Аннотация.** Целью данного исследования является поиск и анализ факторов, входящих в пространственную гравитационную модель при оценке мировых торговых потоков. Базовая модель основана на идее, что объем торговли между двумя странами зависит от их экономического размера и расстояния между ними. Одновременно с этим существуют различные спецификации для основной модели, которые включают множество иных факторов. Новые переменные, добавленные в базовую модель, позволят точнее оценить торговые потоки между странами. В результате исследования были выделены наиболее значимые факторы, которые могут дополнить базовую спецификацию гравитационной модели. В первую очередь можно говорить о группе показателей, косвенно отражающих торговые барьеры или их отсутствие, как, например, наличие общей границы. Также исследователи выделяют численность населения, международные интеграции, культурную дистанцию, обменный курс и его колебания. Важной проблемой в данной теме является отсутствие эмпирических показателей для некоторых теоретических предпосылок, что приводит к необходимости искать косвенные способы учета некоторых факторов.

**Ключевые слова:** международная торговля, гравитационная модель, торговые потоки, экспорт, импорт, валовый внутренний продукт

*А. О. Kiselev<sup>1</sup>, А. Y. Novikov<sup>1\*</sup>*

## **Main factors used in gravity models to analyze global trade flows**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation  
\*e-mail: a.novikov2@g.nsu.ru

**Abstract.** The purpose of this research is to search and analyze the factors included in the spatial gravity model in assessing global trade flows. The basic model is based on the idea that the volume of trade between two countries depends on their economic size and the distance between them. At the same time, there are various specifications for the main model, which include many other factors. New variables added to the basic model will allow for a more accurate assessment of trade flows between countries. As a result of the study, the most significant factors that can complement the basic specification of the gravitational model were identified. First of all, we can talk about a group of indicators that indirectly reflect trade barriers or their absence, such as the presence of a common border. The researchers also highlight population size, international integration, cultural distance, exchange rate and its fluctuations. An important problem in this topic is the lack of empirical indicators for some theoretical assumptions, which leads to the need to look for indirect ways to account for some factors.

**Keywords:** international trade, gravity model, trade flows, exports, imports, gross domestic product

## **Введение**

Практически все ведущие страны мира обладают одним общим свойством – открытостью экономики. Связано это с тем, что внешняя торговля позволяет расширить рынки сбыта товаров, увеличить объемы производства и способствует обмену технологиями. Эти и другие аспекты благоприятно влияют на внутренний экономический климат страны. В связи с этим страны заинтересованы в развитии новых торговых потоков и поддержании старых. Для этого необходимо иметь инструменты качественного и количественного прогнозирования мировой торговли.

В настоящее время гравитационная модель является одним из важнейших инструментом эмпирического анализа международных торговых потоков. Она основывается на формуле закона всемирного тяготения Ньютона, которая рассчитывает силу гравитационного притяжения между двумя физическими объектами по следующей формуле:

$$F = G \times \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad (1)$$

где  $G$  – гравитационная константа,  $m_1$  – масса первого тела,  $m_2$  – масса второго тела, а  $d$  – квадрат расстояния между двумя телами.

Гравитационная модель имеет схожую формулу, предложенную голландским экономистом и нобелевским лауреатом – Яном Тинбергеном в 1962 году. Формула описывает объем экспорта или импорта из страны  $i$  в страну  $j$ :

$$X_{ij} = k \times \frac{GDP_i^\alpha \cdot GDP_j^\beta}{dist_{ij}^\gamma} \quad (2)$$

где  $k$  – гравитационная константа,  $GDP_i$  – валовый региональный продукт первой страны,  $GDP_j$  – валовый региональный продукт второй страны, а  $dist_{ij}$  – расстояние между страной  $i$  до страны  $j$  [1].

Если прологарифмировать формулу (2), то степень переменных сносятся как коэффициенты, которые необходимо оценить при помощи регрессионного анализа.

### **1. Классические гравитационные переменные**

В базовую пространственную гравитационную модель входят всего три переменные: ВВП торгующих стран и расстояние между ними. Все эти факторы однозначно стоит включать в регрессионную модель, так как они оказывают существенное влияние на торговые объемы стран. Рассмотрим их подробнее и проанализируем как переменные базовой модели влияют на торговые потоки.

### ***1.1. Мера экономического масштаба***

Ян Тинберген утверждал, что объем торговых потоков между странами положительно зависят от валового внутреннего продукта этих стран. Этот факт не раз был подтвержден эмпирически. Гравитационные модели показали, что меры экономического масштаба являются важными определяющими факторами двусторонней торговли. Увеличение объема экспорта способствует росту валового продукта, за счет расширения рынка сбыта и продажи товаров за рубеж. С другой стороны, импорт также влияет на валовый продукт, поскольку он отражает спрос на иностранные товары и услуги внутри страны.

### ***1.2. Расстояние между странами***

Расстояние между торгующими странами – фактор, который отрицательно влияет на торговые объемы двух стран. Чем больше расстояние между странами, тем активнее происходит сокращение объемов товарного обмена, в связи с ростом транспортных издержек. При этом существуют различные способы учета расстояний в эконометрических моделях. Чаще всего используются дистанции между столицами или кратчайшие маршруты от границы одной страны до границы другой. Асимметричные показатели могут быть получены при детальной проработке географического расположения центров производства и потребления в каждой стране, что является значительно более трудоемким процессом.

## ***2. Расширенные гравитационные переменные***

В этом разделе будут рассмотрены дополнительные переменные, которые могут оказывать воздействие на двухстороннюю торговлю стран. Важно отметить, что часть переменные для расширенной гравитационной модели является не количественными, а качественными, поэтому будут входить в регрессию в виде фиктивных [2].

### ***2.1. Общая граница***

Логично предположить, что наличие общей границы между парой стран способствует большему объему торговли. Достичь повышенных объемов торговли позволяют следующие факторы: низкие транспортные издержки, тесное взаимодействие и т.д. Одновременно с этим наличие общей границы может облегчить заключение таможенных и торговых соглашений между странами, что может привести к снижению барьеров для торговли и увеличению объема товарооборота. Включается данный фактор в модель при помощи фиктивных переменных – единичное значение переменная принимает в случае наличия общей границы, а нулевое значение в случае её отсутствия [3].

### ***2.2. Численность населения***

Во многих исследованиях можно встретить гравитационную модель, применяемую для анализа иммиграции между отдельными регионами страны. Идея заключается в том, что два густонаселенных региона, расположенных на небольшом расстоянии, будут чаще взаимодействовать [4]. Фактор численности насе-

ления был основан именно на этой идее, только вместо регионов были взяты страны. Считается, что чем больше численность населения в стране, тем больше потенциальный рынок для товаров и услуг. Большое население может произвести больше товаров и услуг, а также предоставлять больший спрос на потребление как товаров внутреннего производства, так и импортных, что приводит к увеличению объема торговых потоков.

### ***2.3. Международные интеграции***

Зачастую создание торговых союзов способствует уменьшению торговых барьеров, упрощению методов расчета и снижению различных торговых ограничений. Торговые союзы и международные организации работая над уменьшением торговых барьеров, способствуют увеличению объемов торговли между странами-участниками. Также для торговых объединений характерно установление норм и правил с целью создания благоприятной торговой среды. Фактор международной интеграции включается в модель при помощи фиктивных переменных. Если страна входит в тот или иной союз, то переменная принимает единичное значение, а в противном случае принимает нулевое.

### ***2.4. Культурная дистанция***

Меры «культурной дистанции» также рассматривались как определяющие факторы международной торговли. Наиболее часто используемой мерой «культурной дистанции» является показатель общего языка, который также задается при помощи фиктивных переменных [3]. Если пара стран говорит на одном и том же языке, то переменная принимает единичное значение и нулевое значение в противном случае.

### ***2.5. Обменный курс***

Кляйн и Шамбо (2004) в своей статье: «Фиксированный обменный курс и торговля» обнаружили, что прямая привязка валютного курса имеет статистически значимую положительную связь с объемом двусторонних торговых потоков [5]. Фиксированный курс обмена валюты способствует стабильности цен на мировых рынках, так как он создает предсказуемую среду для торговли. Этот факт помогает снизить риски, связанные с колебаниями курса обмена валюты, что может быть особенно важно для компаний, занимающихся международной торговлей. Задается данный фактор при помощи фиктивной переменной, принимая значение единицы, в случае если пара стран поддерживает фиксированный обменный курс и нулевое значение в противном случае.

### ***2.6. Колебания обменного курса***

Широкий диапазон валютной политики, применяемой в разных странах, предполагает большие различия в уровнях волатильности обменного курса. Согласно теоретическому анализу, связь между волатильностью обменного курса и двусторонней торговлей неоднозначна и обычно зависит от источника колебаний обменного курса. Однако высокая волатильность должна приводить к мень-

шим объемам торговли, так как создает неопределенность и усложняет прогнозирование будущих изменений в курсе валюты [3].

### ***Заключение***

В результате данного исследования были проанализированы факторы, входящие как в базовую, так и в расширенную гравитационную модель. В базовую модель входят факторы, оказывающие наибольшее влияние на объем торговых потоков, такие как валовые продукты торгующих стран и расстояние между ними. В расширенной модели факторы, влияющие на товарообмен двух стран, но уже в меньшей степени. Такие как наличие общей границы, численность населения, международная интеграция и т.д. Понимание этих факторов может помочь в прогнозировании будущих изменений в торговых отношениях и разработке стратегии внешнеторговой деятельности.

Факторы, перечисленные в данной работе, не являются универсальными. Их значимость может варьироваться в зависимости от рассматриваемых рынков и набора стран. Каждое исследование преследует свои цели и имеет разные предметы и объекты изучения. Поэтому использование рассмотренных факторов всегда остается на усмотрение авторов. Тем не менее, данное исследование может послужить отличной отправной точкой при отборе факторов для построения гравитационной модели.

### ***Благодарности***

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 23-78-10157.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Шумилов А. В. Оценивание гравитационных моделей международной торговли: обзор основных подходов // Экономический журнал ВШЭ. – 2017. – 21 (2). – С. 224-250.
2. Томаев А. О., Павлов П. Н., Каукин А. С. Внутренняя торговля России: применение гравитационной модели // Экономическая политика. – 2020. – Т. 15. – №. 5. – С. 60-89.
3. Baxter M., Kouparitsas M. A. What determines bilateral trade flows // NBER Working Paper. – 2006. – № 12188.
4. Lewer J. J., Den Berg H. V. A gravity model of immigration // Economics Letters. – 2008. – 99 (1). – P. 164–167.
5. Klein M., Shambaugh J. C. Fixed exchange rates and trade // Journal of international Economics. – 2008. – 70 (2). – P. 359-383.

© А. О. Киселёв, А. Ю. Новиков, 2024

*А. В. Комарова<sup>1,2</sup>\*, Т. Ким<sup>2</sup>*

## **Факторы устойчивого развития нефтегазовых компаний России**

<sup>1</sup>Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: a.komarova@g.nsu.ru

**Аннотация.** Исследование посвящено вопросам влияния отдельных групп факторов на общее устойчивое развитие компаний. Наличие разнообразных индикаторов в области устойчивого развития усложняет принятие решения, поэтому в работе предлагается использовать интегральный индикатор, состоящий из экономического, социального и экологического компонента. Предложен алгоритм оценки индикатора с усовершенствованным подходом к подготовке отдельных показателей для расчетов. В результате были выявлены различные структуры индикатора для компаний сектора. Преобладающей группой факторов остаются экономические показатели, которые при этом обладают наименьшей стабильностью. Динамика социального показателя является стабильной как в целом, так и для отдельных показателей. Вклад экологической группы факторов различается для компаний, что может быть в том числе связано с отсутствием единого формата представления отчетности.

**Ключевые слова:** устойчивое развитие, интегральный показатель, нефтяная отрасль

*A. V. Komarova<sup>1,2</sup>\*, T. Kim<sup>2</sup>*

## **Factors of sustainable development of oil and gas companies in Russia**

<sup>1</sup> Institute of Economics and Industrial Engineering of SB RAS,  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: a.komarova@g.nsu.ru

**Abstract.** The study is devoted to the identification of the influence of certain groups of factors on the overall sustainable development of companies. The presence of various indicators in the field of sustainable development complicates decision-making, so the work proposes an integral indicator consisting of economic, social and environmental components. An algorithm for assessing the indicator with an improved approach to preparing individual indicators for calculations is proposed. As a result, different indicator structures for companies in the sector were identified. The predominant group of factors remains economic indicators, which at the same time have the least stability. The dynamics of the social indicator is stable both in general and for individual indicators. The contribution of the environmental group of factors varies among companies, which may also be due to the lack of a uniform reporting format.

**Keywords:** sustainable development, integral indicator, oil industry

## *Введение*

Для удовлетворения растущего спроса на энергию необходимы значительные инвестиции во все энергетические ресурсы, включая нефть и газ. Причем в связи с высокой капиталоемкостью и рискованностью деятельности в отрасли потребность в инвестициях особенно высока.

Зеленые активы и компании, придерживающиеся принципов устойчивого развития, все больше привлекают внимание инвесторов. Соблюдение экологических норм и программ часто влечет за собой прямые затраты на их реализацию, тогда как соответствующие выгоды обычно являются косвенными и не всегда выражаются в денежном выражении. Поэтому организации должны оценивать и сравнивать финансовую эффективность различных мер. Компаниям ТЭК важно использовать управленческий подход в оценке общего влияния показателей устойчивого развития, связанных с окружающей средой, финансами и обществом, на их деятельность. Кроме того, для таких оценок необходима система показателей. Учитывая быстрое развитие национальной и корпоративной экологической политики, эти показатели также могут повлиять на финансово-экономические результаты.

Признание энергетических корпораций одними из основных источников глобального загрязнения требует принятия более устойчивых и экологически ответственных рамок для производства, распределения и сбыта их товаров [1]. Сегодня компании топливно-энергетического комплекса, в первую очередь нефтяные и угольные, сталкиваются с новыми вызовами в связи с усилением требований к соблюдению экологических норм [2].

Одним из подходов к успешной реализации экологических решений является внедрение и реализация «зеленых» практик, способствующих тем самым снижению вредных экологических последствий, связанных с внутренней деятельностью организации [3]. В соответствии с этой тенденцией компании демонстрируют свою обязанность и ответственность за безопасность, стратегию и защиту экосистемы во всей своей деятельности, связанной с окружающей средой [4].

Таким образом, чтобы решить задачу устойчивого развития, компаниям необходим комплексный подход к оценке, который будет служить основой для принятия решений, поскольку комплексные показатели устойчивости могут помочь им применить новый подход к управлению и принимать более эффективные решения. Интегральные индикаторы устойчивости используют упрощенные, количественные представления сложных конфигураций множества индикаторов и, следовательно, более удобны для использования в процессах управления [5].

Широкий спектр исследований посвящен изучению факторов, влияющих на уровень финансовых показателей российских нефтегазовых компаний, и определение наиболее важных из них с особым акцентом на экологические факторы. Так, например, для объяснения изменений капитализации компаний используются следующие группы показателей: макроэкономическая (ВВП России и ин-

фляция), микроэкономическая (доходы корпораций, чистая прибыль, налоговые выплаты, рентабельность активов, рентабельность собственного капитала, соотношение заемного капитала к собственному), промышленности (экспорт нефти, нефтепереработка, корпоративное производство и доказанные запасы) и зеленых факторов [6].

### *Методы и данные*

Основным применяемым методом в исследовании является мультикритериальная оценка, которая позволяет учесть и интегрировать влияние различных факторов. Дополнительно будет использоваться факторный анализ для определения вклада отдельных факторов.

Методический подход к динамической оценке интегрального показателя устойчивого развития компании состоит из следующих стадий:

1. Выбор и расчет показателей экономической, социальной и экологической эффективности деятельности предприятия на основе обзора литературы, методик рейтингов ESG и доступных данных.

2. Масштабирование и нормализация набора данных с учетом возможных отрицательных значений показателей. Также учитывается направленность показателей с точки зрения содержательного анализа. В случае, если более высокий показатель может означать худшую ситуацию для компании, рассчитывалось обратное значение.

3. Выбор показателей с наибольшим влиянием и наибольшей изменчивостью с использованием метода цепной подстановки для рассматриваемого периода.

4. Расчет отдельных агрегированных показателей по выбранным направлениям (экономические, социальные и экологические показатели) по формуле среднего геометрического с использованием показателей, выбранных на стадии (3) и подготовленных к расчету на стадии (2).

5. Расчет агрегированного показателя (интегрального показателя устойчивого развития нефтяной компании) по формуле среднего геометрического.

$$SD = \sqrt[3]{(SD_{econ}) \times (SD_{social}) \times (SD_{enw})} \quad (1)$$

где  $SD$  – интегральный показатель устойчивого развития нефтяной компании;  $SD_{econ}$ ,  $SD_{social}$ ,  $SD_{enw}$  – оценка экономической, социальной и экологической составляющих, полученных на стадии (4), соответственно

6. Сравнение промежуточных и итоговых показателей за разные годы и компании для выявления областей для улучшения компании.

База данных исследования сформирована на основе открытых данных финансовой отчетности, экологической отчетности и отчетов об устойчивом развитии крупнейших нефтегазовых компаний России за период 2018-2021 гг.

## Результаты и обсуждение

На начальном этапе исследования была сформирована и обработана база данных на основе отчетов компаний. Далее рассчитаны показатели по каждому из компонентов интегрального индекса (табл. 1).

Среднее геометрическое значение экономических показателей демонстрирует значительную волатильность в период с 2018 по 2021 гг. и остается в целом нестабильным. Хотя доля собственного капитала и коэффициент кредитного плеча демонстрируют относительно стабильную картину с высокими показателями, коэффициент покрытия процентов и коэффициент долговой нагрузки нестабильны. После вспышки COVID-19 в 2020 году показатель EBIT дочерних компаний «Роснефти» был чрезвычайно низким, что привело к низкому коэффициенту покрытия процентов. Однако резкое увеличение EBIT в 2021 году способствовало восстановлению коэффициента покрытия процентов. Коэффициент покрытия процентов служит мерой способности компании погасить свой долг, что помогает инвесторам, финансовым учреждениям и рынку оценить текущее финансовое состояние компании.

Показатель коэффициента долговой нагрузки был очень нестабильным в период с 2019 по 2021 год. В 2020 году по сравнению с 2019 годом долг «Роснефти» увеличился, но показатель EBITDA снизился из-за воздействия COVID-19, что привело к резкому увеличению коэффициента долговой нагрузки (уменьшению обратного показателя); В 2021 году EBITDA восстановилась, но долг компании по-прежнему был высок, а это означает, что коэффициент долговой нагрузки немного выше, чем в 2019 году.

Таблица 1

Пример результатов расчета нормированных компонентов с наибольшим влиянием для экономического показателя для ПАО «Роснефть»

Нормированные экономические показатели	Год			
	2018	2019	2020	2021
Коэффициент покрытия процентов	0,52	0,80	0,12	1,00
Коэффициент долговой нагрузки	0,90	1,00	0,45	0,87
Коэффициент кредитного плеча	0,99	0,88	1,00	0,91
Доля собственного капитала	0,89	1,00	0,89	0,97
Экономический показатель	0,80	0,92	0,47	0,93

Таким же образом были рассчитаны экологический и социальный показатель, на основе которых в свою очередь был рассчитан интегральный показатель устойчивого развития компаний (рис. 1).

Социальный показатель в представленном примере имеет стабильную динамику как в целом, так и для отдельных факторов. Экономический показатель имеет значительную зависимость от макроэкономических шоков. Так, в 2020 г. наблюдалось снижение практических всех составляющих данного индекса и, как

следствие, нестабильная динамика показателя. Экологический фактор вносит наименьший вклад в интегральный показатель из-за низкого значения.

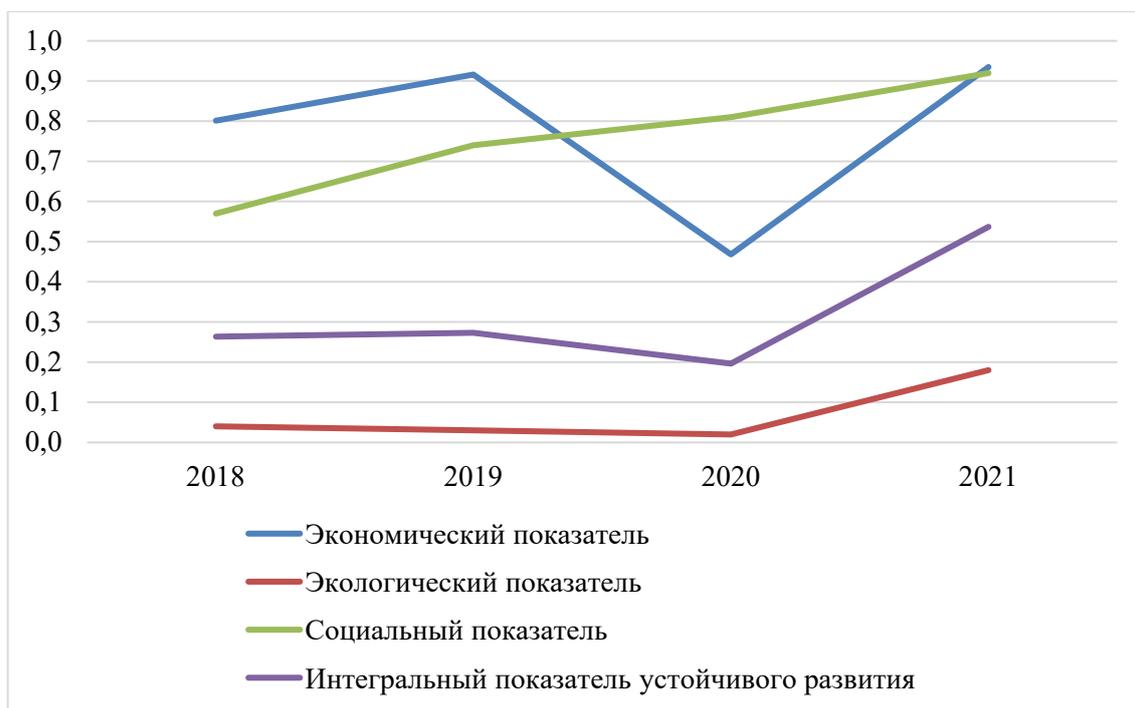


Рис. 1. Пример результатов расчета интегрального показателя устойчивого развития для компании ПАО «Роснефть»

### *Заключение*

Экологические нормы и контроль за их выполнением усиливаются в нефтегазовой отрасли из-за глобальных экологических и климатических инициатив, таких как Цели устойчивого развития ООН, которые могут существенно повлиять на прибыльность бизнеса. Инвестиции в зеленые фонды или устойчивые инвестиции также являются важной современной тенденцией. В рамках данного исследования был предложен интегральный индекс оценки устойчивости, который может быть использован управленцами в топливно-энергетических организациях. Показатель учитывает совместное влияние экологических, финансовых и социальных показателей.

Для рассматриваемого примера наименее устойчивым себя показал экономический индикатор вследствие влияния экономического кризиса 2020 г. Экологические показатели компании хоть и показывают стабильную динамику, но имеют низкие абсолютные значения. Таким образом, можно порекомендовать компании уделять внимание повышению эколого-климатических показателей.

В рамках дальнейшего развития методики можно рассмотреть применение весовых коэффициентов для показателей и учет нелинейного поведения факторов.

## *Благодарности*

Доклад подготовлен в рамках НИР ИЭОПП СО РАН, проект 5.6.6.4. (0260-2021-0008) "Методы и модели обоснования стратегии развития экономики России в условиях меняющейся макроэкономической реальности".

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mallett J. E., Michelson S. Green investing: is it different from socially responsible investing? // *International Journal of Business*. 2010. Vol. 15. Iss. 4. P. 1-16.
2. Morgunova M., Shaton K. The role of incumbents in energy transitions: Investigating the perceptions and strategies of the oil and gas industry // *Energy Research & Social Science*. 2022. Vol. 89. P. 1-12.
3. Sulich A., Rutkowska M. Factor analysis of the green management in the context of Poland regions sustainable development // *International Conference on Computational Methods in Experimental Economics*. Cham: Springer. 2018. pp. 143-156.
4. Azapagic A. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry // *Journal of Cleaner Production*. 2004. Vol. 12. Iss. 6. P. 639-662.
5. Butnariu A., Avasilcai S. The Assessment of The Companies' Sustainable Development Performance // *Procedia Economics and Finance*. 2015. Vol. 23. P. 1233-1238.
6. Filimonova I., Komarova A., Mishenin M. Impact of the global green factor on the capitalization of oil companies in Russia // *Oeconomia Copernicana*. 2020. Vol. 11. Iss. 2. P. 309-324.

© А. В. Комарова, Т. Ким, 2024

*Д. С. Кубышев<sup>1</sup>, А. В. Комарова<sup>1\*</sup>*

## **Влияние налогового бремени на экономический рост регионов России**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\*e-mail: a.komarova@g.nsu.ru

**Аннотация.** Одно из основных противоречий налоговой системы связано с возможным отрицательным влиянием высокого уровня налогов на экономический рост через механизм чрезмерного изъятия доходов и прибыли. Целью исследования является получение количественной оценки влияния регионального налогового бремени на экономический рост регионов России за период 1995-2021 гг. На основе модели производственно-институциональной функции была составлена модель линейной регрессии. В работе показано, что налоговое бремя было ниже оптимального уровня и оказало положительный эффект на экономический рост в регионах. Модель также показала, что прирост основных фондов негативно влияет на экономический рост, что может быть связано с избытком этого ресурса. Влияние отдельных налогов может быть оценено в дальнейших исследованиях.

**Ключевые слова:** налоговое бремя, экономический рост, регионы России

*D. S. Kubyshev<sup>1</sup>, A. V. Komarova<sup>1\*</sup>*

## **The impact of the tax burden on the economic growth of Russian regions**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation  
\*e-mail: a.komarova@g.nsu.ru

**Abstract.** One of the main contradictions of the tax system is related to the possible negative impact of high taxes on economic growth through the mechanism of excessive withdrawal of income and profits. The aim of the study is to obtain a quantitative assessment of the impact of the regional tax burden on the economic growth of Russian regions over the period 1995-2021. Based on the model of the production and institutional function, a linear regression model was compiled. The paper shows that the tax burden was below the optimal level and had a positive effect on economic growth in the regions. The model also showed that the growth of fixed assets negatively affects economic growth, which may be due to an excess of this resource. The impact of individual taxes can be assessed in further studies.

**Keywords:** tax burden, economic growth, regions of Russia

### ***Введение***

Институт государства берет на себя те функции по поддержанию и улучшению жизни населения, которые в силу их масштаба и технологической сложности не могут быть выполнены или качественно выполнены силами отдельных лиц или небольших объединений людей. Для выполнения этих функций у госу-

дарства существуют определенные источники дохода, основным из которых являются налоговые доходы.

В механизм и функции налоговой системы заложено несколько противоречий. С одной стороны, чем больше налоговых поступлений соберёт государство, тем больше задач оно сможет выполнить и тем более качественно они будут выполнены. Однако изъятие слишком большой доли доходов или прибыли может препятствовать развитию экономики через дестимулирование инвестиций и, как следствие, производства и потребления товаров и услуг. Для количественной оценки доли изымаемых налогов в работе используется относительный показатель – налоговое бремя. Налоговое бремя можно рассчитать как отношение налоговых поступлений к налоговой базе, где налоговой базой может выступать доход домохозяйств, выручка фирмы или ВВП страны в зависимости от выбора объекта для оценки.

Оценивание влияния налогов в форме налогового бремени и не только на экономический рост встречается в работах различных российских и иностранных исследователей. В своей статье Балацкий Е.В. исследует возможность применения предпосылок кривой Лафера к максимизации экономического роста через поиск точек Лафера первого и второго порядка. По результатам исследования сделан вывод на межстрановом уровне отсутствует наличие общих закономерностей, кроме слабого тяготения точки максимального налогового бремени к уровню 35% [1]. В литературе рассматривался вопрос формирования производственной функции с включением налоговой нагрузки в том числе для отдельных регионов РФ [2].

Большое количество работ посвящено исследованию экономики развитых стран. Так, на примере США была продемонстрирована положительная связь между увеличением налоговых поступлений и экономическим ростом в первую очередь для подоходного налога и социальных отчислений [3]. Схожее исследование для стран ОЭСР выявило отрицательное отношение между экономическим ростом и подоходным налогом, корпоративным налогообложением и социальными взносами. Авторы рекомендовали изменить форму изъятия налогов с прямой на косвенную [4].

Таким образом, на макроуровне выявлена проблема определения влияния налогового бремени на экономический рост. При этом оптимальный размер налогового бремени не является постоянной величиной, потому что в оптимуме налоговое бремя должно не просто максимизировать экономический рост, но и обеспечивать заданный уровень необходимых государственных расходов, который может постоянно изменяться. Поэтому определение влияния налогового бремени на экономический рост крайне актуально.

Целью работы является исследование влияния налогового бремени на экономический рост, в частности, на регионы России.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Определение факторов, влияющих на экономический рост и поиск необходимой для расчетов статистической информации.

2. Построение эконометрической модели влияния налогового бремени на экономический рост регионов РФ.

3. Получение количественных оценок влияния налогового бремени на экономический рост Субъектов России и формирование соответствующих выводов.

Объектом исследования являются экономические и налоговые индикаторы регионов РФ.

### *Методы и данные*

Для количественного оценивания влияния налогового бремени на экономический рост регионов РФ в качестве базовой модели была выбрана модель производственной функции. Налоговое бремя можно рассматривать в качестве институционального фактора производства, а не как часть доходов или расходов государства, поэтому логичнее и более просто в расчётах учитывать налоговое бремя в составе производственной функции, а не в составе ВРП по доходам или расходам.

После выбора базовой модели были определены факторы, которые войдут в эту самую модель. К ним относятся:

- среднегодовая численность рабочей силы, которая будет представлять трудовые ресурсы;
- объем основных фондов, выступающих в качестве капитальных ресурсов;
- налоговое бремя на региональном уровне – основной из рассматриваемых в работе факторов;
- темп прироста численности персонала, занятого научными исследованиями и разработками – фактор, отвечающий за научно-технический прогресс.

Первые два фактора – основные составляющие модели производственной функции, налоговое бремя – фактор, вклад которого будет проверен в рамках работы, а фактор научно-технического прогресса отвечает за качественное развитие экономики, т.к. вследствие НТП увеличивается предельная производительность как труда, так и капитала.

Для сбора данных по зависимой переменной и факторам были использованы материалы Федеральной службы государственной статистики (Росстат) и Федеральной налоговой службы за 1995-2021 гг.

Далее была составлена исходная модель производственно-институциональной функции:

$$Y_t = e^{(a+b*q_t+c*(\rho_I)_t)t} * K_t^{\alpha_K} * L_t^{\alpha_L}, \quad (1)$$

где  $Y$  – ВВП в году  $t$ ;

$q$  – налоговое бремя на государственном уровне в году  $t$ ;

$K$  – объем основных фондов страны в году  $t$ ;

$L$  – среднегодовая численность рабочей силы страны в году  $t$ ;

$\rho_I$  – темп прироста численности персонала, занятого научными исследованиями и разработками в году  $t$ .

$a, b, c, \alpha_K, \alpha_L$  – корректирующие коэффициенты.

Налоговое бремя входит в состав степени экспоненты, то есть в состав нейтрального научно-технического прогресса по Хиксу, поскольку является институциональным фактором экономического роста, который влияет на экономику в целом. От модели требуется, чтобы влияние налогового бремени на ВВП было не монотонным, а переменным, в частности, с положительного на отрицательное. Это объясняется тем, что рост налогового бремени в случае низких его значений оказывает положительное влияние на экономику из-за значительного роста государственных расходов, и незначительного спада предпринимательской активности, а в случае высоких значений налогового бремени его рост приведет к уменьшению ВВП из-за незначительного повышения государственных расходов на фоне существенного спада предпринимательской активности. Для удовлетворения этому требованию и были введены коэффициенты  $a$  и  $b$ . Первый коэффициент нужен для корректировки точки максимума ВВП, чтобы она находилась в первой четверти координатной плоскости, а от второго коэффициента нужен лишь знак. При малых значениях налогового бремени относительно его оптимального уровня он должен быть положительным, а при высоких значениях – отрицательным.

Далее, для получения регрессионной модели, осуществляется переход к приростным показателям:

$$\rho_Y = a + b * q + c * \rho_I + \alpha_K * \rho_K + \alpha_L * \rho_L + e, \quad (2)$$

где  $\rho_Y$  – темп экономического роста в году  $t$ ;

$\rho_K$  – темп прироста объема основных фондов в году  $t$ ;

$\rho_L$  – темп прироста среднегодовой численности рабочей силы в году  $t$ ;

$e$  – ошибка регрессии в году  $t$ .

На основе этой модели были количественно оценены вклады факторов, в том числе налогового бремени, в экономический рост.

### *Результаты и обсуждение*

После подстановки данных по годам в модель линейной регрессии в соответствии с формулой (2), получилась следующая итоговая таблица (табл. 1).

*Таблица 1*

Оценка коэффициентов регрессии

Фактор	Оценка	Стандартная ошибка	$t$ -значение	$p$ -значение
<i>Intercept</i>	-8,69	6,17	-1,41	0,17
Налоговое бремя	0,56	0,25	2,27	0,03
Прирост трудовых ресурсов	1,51	0,45	3,37	0,00
Прирост капитальных ресурсов	-1,08	0,49	-2,20	0,04
Прирост инновационных ресурсов	0,65	0,30	2,19	0,04

Мы можем увидеть, что коэффициент при налоговом бремени оказался значимым и положительным. Также нельзя не отметить отрицательную оценку прироста капитальных ресурсов. Далее были проведены тесты на соответствие этой модели классической модели линейной регрессии, которые показали отсутствие в модели эндогенности, гетероскедастичности и автокорреляции.

Положительный коэффициент при налоговом бремени говорит о том, что его увеличение приведет к повышению уровня ВРП. Это означает, что за рассматриваемый период значение налогового бремени в целом было ниже, чем его оптимальный уровень. Отрицательная оценка прироста основных фондов может означать, что капитальные ресурсы были в избытке, что ограничивало экономический рост. В работе Е.В. Балацкого используется несколько иная модель и строится она на данных 1990-2000 гг., однако он приходит к похожим выводам: налоговое бремя было ниже оптимального, а существующий уровень основных фондов замедляет экономику России [1].

### *Заключение*

Одно из основных противоречий налоговой системы связано с возможным отрицательным влиянием высокого уровня налогов на экономический рост через механизм чрезмерного изъятия доходов и прибыли. В рамках обзора литературы было выявлено, что для разных стран наблюдается неоднозначная связь данных показателей. Это может быть связано с нелинейностью зависимости экономического роста от налогового бремени и существованием точек перегиба.

В рамках построенной эконометрической модели было выявлено положительное влияние налогового бремени на экономический рост для регионов России в 1995-2021 гг. Необходимо отметить, что дальнейшее исследование может лежать в плоскости структуры налоговой системы. Например, выделение роли прямых и косвенных налогов, а также влияния отдельных видов налогов.

### *Благодарности*

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 22-18-00424.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Балацкий Е. В. Анализ влияния налоговой нагрузки на экономический рост с помощью производственно-институциональных функций // Проблемы прогнозирования. – 2003. – №. 2. – С. 88-105.
2. Какаулина М. О., Цепелев О. А., Латкин А. П. Моделирование влияния налоговой нагрузки на экономический рост региона с учетом ресурсного потенциала // Налоги и налогообложение. – 2014. – №. 8. – С. 774-790.
3. Kalaš B., Mirović V., Andrašić J. Estimating the impact of taxes on the economic growth in the United States // Economic Themes. – 2017. – Т. 55. – №. 4. – С. 481-499.
4. Macek R. The impact of taxation on economic growth: Case study of OECD countries // Review of economic perspectives. – 2014. – Т. 14. – №. 4. – С. 309-328.

© Д. С. Кубышев, А. В. Комарова, 2024

*Я. А. Мкртчян<sup>1</sup>, Е. А. Кузнецова<sup>1</sup>*

## **Устойчивое развитие развивающихся стран в контексте продовольственной безопасности**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

**Аннотация.** В статье рассматриваются различные теоретические подходы к оценке продовольственной безопасности и ее взаимосвязь с достижением целей устойчивого развития. Анализируются ключевые показатели продовольственной безопасности, такие как доля недоедающих, ежедневное потребление калорий на душу населения, составные индексы продовольственной безопасности. Факторы, используемые для оценки продовольственной безопасности, включают прямые иностранные инвестиции (ПИИ), валовой внутренний продукт (ВВП) на душу населения, рост населения, объемы импорта и экспорта продовольствия, а также индексы политической стабильности. Концепция продовольственной безопасности рассматривается через призму различных теоретических концепций. Анализ исследований и теоретических подходов показывает необходимость комплексного подхода к обеспечению продовольственной безопасности. Такой подход включает в себя учет экономических, социальных, экологических факторов, всесторонний анализ и сотрудничество на всех уровнях, как на глобальном уровне, так и на местном.

**Ключевые слова:** продовольственная безопасность, устойчивое развитие, прямые иностранные инвестиции

*Y. A. Mkrтчyan<sup>1</sup>, E. A. Kuznetsova<sup>1</sup>*

## **Sustainable Development of Developing Countries in the Context of Food Security**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk,  
Russian Federation

**Abstract.** The article examines various theoretical approaches to assessing food security and its relationship with achieving sustainable development goals. Key food security indicators, such as the prevalence of undernourishment, daily per capita calorie intake, and composite food security indices, are analyzed. The concept of food security is explored through the lens of different theoretical frameworks. Factors used to assess food security include foreign direct investment (FDI), gross domestic product (GDP) per capita, population growth, food import and export volumes, and political stability indices. Analysis of research and theoretical approaches highlights the necessity of a comprehensive approach to ensuring food security. This approach includes consideration of economic, social, and environmental factors, thorough analysis, and cooperation at all levels, both globally and locally.

**Keywords:** food security, sustainable development, foreign direct investment

## ***Введение***

Продовольственная безопасность стран является одним из элементов национальной безопасности. Актуальность исследования этого явления возросла в связи с рядом непредвиденных обстоятельств таких как пандемия COVID-19 и политическое напряжение между странами, повлиявших на установившийся мировой порядок. Более того решение проблем обеспечения продовольственной безопасности имеет тесную связь с достижением целей устойчивого развития, поскольку агропромышленный комплекс немаловажен как для ликвидации голода и нищеты, так и для выживания человека в целом.

Специализированным учреждением ООН по борьбе с голодом является созданная в 1945г. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО), деятельность которой направлена на обеспечение и гарантирование продовольственной безопасности в мире. Ежегодно подразделение ООН предоставляет обзоры о мировой продовольственной ситуации, ведет мониторинг достижения ЦУР. Согласно отчету ФАО, распространенность голода в мире возросла с 768 млн чел в 2020г. до 828 млн чел в 2021г.

Для обеспечения выполнения целей, обозначенных в Повестке дня на период до 2030 года ФАО ведет деятельность в рамках четырех направлений улучшений: улучшение производства, улучшение качества питания, улучшение состояния окружающей среды и улучшение качества жизни. При этом особое внимание уделяется развивающимся странам, как территориям наиболее уязвимым и менее защищенным. Основополагающим принципом в рамках реализации Стратегической рамочной программы ФАО является принцип «никто не должен остаться без внимания», что подразумевает необходимость осуществления комплексного подхода по всем направлениям - сотрудничества стран как в инвестиционной сфере, так и в внешнеторговое, производственное и научно-техническое сотрудничество. В частности, речь идет о повышении эффективности агропромышленных систем, инновационной деятельности стран по обеспечению устойчивости к климатическим и стихийным изменениям. Влияние ряда факторов носит противоречивый характер, а потому и представляется интересным для исследования. Так, одним из способов поддержания продовольственной безопасности в странах с невысоким доходом являются иностранные инвестиции, поскольку они решают вопросы бедности. Но данной вопрос остается дискуссионным.

### ***Методы оценки продовольственной безопасности***

Существует несколько подходов к оценке продовольственной безопасности, включающих в себя использование различных показателей и факторов. Продовольственная безопасность рассматривается с точки зрения различных теоретических концепций: теория модернизации, теория экономической зависимости, теория милитаризма, неомальтузианская теория, теория экологических эволюционных процессов. Эти теории помогают объяснить характер взаимосвязи между прямыми иностранными инвестициями и продовольственной безопасностью в разных контекстах. Так, теория модернизации связывает рост уровня продоволь-

ственной безопасности с притоком иностранного капитала и технологий. Теория экономической зависимости оценивает данный фактор как негативно влияющий на продовольственную безопасность. Теория милитаризма связывает ухудшение уровня продовольственной безопасности с усилением политической напряженности. Теория городского смещения связывает усиление социального и отраслевого неравенства с замедлением сельскохозяйственного развития. Согласно теории неомальтузианского давления населения с ростом численности населения происходит ухудшение состояния окружающей среды, что приводит к снижению уровня продовольственной безопасности.

Однако для более полного понимания необходимо рассмотреть индикаторы уровня обеспечения продовольственной безопасности (ПБ). Часто используемыми показателями для оценки ПБ являются доля недоедающих, ежедневное потребление калорий на душу населения, ежедневное потребления протеина на душу населения, составные индексы ПБ.

Анализ российской и зарубежной литературы показал, что нет единого отношения к формированию методики оценивания продовольственной безопасности и определению факторов, влияющих на нее. Группировка показателей продовольственной безопасности может быть осуществлена по нескольким критериям:

1. По уровню оценивания: глобальный уровень – оценка производится на уровне международных организаций (индексы ПБ ФАО), национальный уровень – оценка на уровне отдельных стран (национальные показатели), индивидуальный уровень – оценка на уровне домохозяйств, отдельных лиц.

2. По аспектам продовольственной безопасности: наличие продовольствия (например, объем сельскохозяйственного производства), доступность продовольствия (уровень доходов, цен на продовольствие и т.д.), использование продовольствия (ежедневное потребление калорий), стабильность продовольственных поставок (уровень политической стабильности, развития инфраструктуры).

3. По типу данных: статические и динамические показатели.

4. По фокусу на определенной информации: экономические, социальная, экологические показатели.

Нередко объясняющие переменные разбиты на такие группы как: экономическое развитие, демографическое развитие, международная торговля, финансовая система и др. В качестве независимых переменных берутся прямые иностранные инвестиции как ключевой фактор, влияющий на уровень продовольственной безопасности, ВВП на душу населения, численность населения, объемы экспорта и импорта продовольствия. Исследователи также учитывают влияние внешних факторов, изменения климата, геополитическую нестабильность, экономические кризисы.

## *Заключение*

Устойчивое развитие и обеспечение уровня продовольственной безопасности являются взаимосвязанными и важными компонентами благополучия развивающихся стран.

В ходе изучения работ множества авторов было выявлено, что при оценивании развивающихся стран исследователи применяют разные подходы к выбору переменной, отвечающей за продовольственную безопасность, а влияние ПИИ на уровень продовольственной безопасности остается интересным объектом исследования на протяжении нескольких лет.

Рассмотренные теоретические концепции и результаты существующих исследования подчеркивают необходимость комплексного подхода для обеспечения устойчивой развития и роста продовольственной безопасности в развивающихся странах. Координация усилий на международном, национальном и местном уровнях, учет влияния глобальных факторов, экономических, социальных и экологических аспектов позволят достичь устойчивого развития и обеспечения высокого уровня ПБ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жиряева Е.В. Классификация показателей продовольственной безопасности и оценка их значения для политики Российской Федерации // Управленческое консультирование. - 2020. - №12. - С. 49-67.
2. Копнова Е.Д., Родионова Л.А. Моделирование влияния иностранных инвестиций на продовольственную безопасность на основе моделей панельной коинтеграции // Бизнес-информатика. - 2017. - №3. - С. 41.
3. Назаренко В.И. Неомальтузианство и продовольственная безопасность // Агропродовольственная политика России. - 2012. - №6. - С. 16-19.
4. Якимович Е.А. ТРАНСФОРМАЦИЯ ТРАКТОВОК ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ // Вестник РУДН. Серия: Экономика. - 2023. - №1. - С. 91-106.
5. Яшкова Н.В. и др. Сравнительный анализ критериев оценки уровня продовольственной безопасности // Региональные проблемы преобразования экономики. - 2018. - №8. - С. 29-36.
6. Barrett C. B. Measuring Food Insecurity. // Science. - 2010. - №327(5967). - С. 825-828.
7. Doğan B. Does FDI in agriculture promote food security in developing countries? The role of land governance // Transnational Corporations Journal. - 2022. - №29(2). - С. 895–921.
8. Jenkins J. C., Scanlan S. J. Food Security in Less Developed Countries, 1970 to 1990 // American Sociological Review. - 2001. - №66(5). - С. 718-744.
9. Kopnova E., Rodionova L. An Analysis of the Economic Determinants of Food Security in North Africa // Higher School of Economics Research Paper. - 2017. - №WP BRP 166/EC/2017. - С. 23.
10. Maxwell S. Food security: a post-modern perspective. // Food Policy. - 1996. - №21(2). - С. 155-170.
11. Mc Carthy U. et al. Global food security – Issues, challenges and technological solutions. // Trends in Food Science & Technology. - 2018. - №77. - С. 11-20.
12. Santeramo F. G. On the Composite Indicators for Food Security: Decisions Matter! // Food Reviews International. - 2014. - №31(1). - С. 63-73.

13. Slimane M.B. et al. Direct and indirect effects of FDI on food security: a sectoral approach // Workshop MAD Macroeconomics of Agriculture and Development - What challenges food security ?. - 2013. - №1302. - С. 27.
14. Wimberley D. W., Bello R. Effects of Foreign Investment, Exports, and Economic Growth on Third World Food Consumption // Social Forces. - 1992. - № 70(4). - С. 895–921.
15. Yao H. et al. Analyzing the Relationship between Agricultural FDI and Food Security: Evidence from Belt and Road Countries // Sustainability. - 2020. - №12(7). - С. 1-20.

© Я. А. Мкртчян, Е. А. Кузнецова, 2024

*В. Е. Морозова<sup>1\*</sup>, И. В. Проворная,<sup>1,2\*</sup>*

## **Применение метода главных компонент для исследования выполнения параметров государственных программ**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\*e-mail: v.morozova2@g.nsu.ru

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

\*e-mail: i.provornaia@g.nsu.ru

**Аннотация.** В статье производится анализ показателей программы Иркутской области, направленной на снижение энергоёмкости ВРП и повышение энергетической эффективности. По проведённым расчетам, наиболее значимыми факторами оказались количество аварий в системах теплоснабжения, строительство и модернизация энергоинфраструктуры, потребление природного газа, госконтроль в сфере строительства, госрегулирование тарифов и ценообразования, капремонт многоквартирных домов. Были сформулированы рекомендации по дальнейшей работе с данными показателями, направленной на достижение плановых показателей энергоёмкости и энергоэффективности региона: стимулировать и расширять строительство и модернизацию энергетической инфраструктуры, потребление природного газа, госконтроль в сфере строительства, госрегулирование тарифов и ценообразования, внедрять энергоэффективные технологии при осуществлении капремонта многоквартирных домов, а также работать над снижением количества аварий в системах теплоснабжения.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, энергопотребление, энергоёмкость, метод главных компонент

*V. E. Morozova<sup>1\*</sup>, I. V. Provornaya<sup>1,2\*</sup>*

## **Application of the principal component analysis for the study of the implementation of the parameters of government programs**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation

\* e-mail: v.morozova2@g.nsu.ru

<sup>2</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Novosibirsk, the Russian Federation

\*e-mail: i.provornaia@g.nsu.ru

**Abstract.** The article analyzes the indicators of the Irkutsk Region program aimed at reducing the energy intensity of GRP and increasing energy efficiency. According to the calculations, the most significant factors were the number of accidents in heat supply systems, construction and modernization of energy infrastructure, natural gas consumption, state control in the construction sector, state regulation of tariffs and pricing, overhaul of apartment buildings. Recommendations were formulated for further work with these indicators aimed at achieving planned indicators of energy intensity and energy efficiency in the region: to stimulate and expand the construction and modernization of energy infrastructure, natural gas consumption, state control in the construction sector, state regulation of tariffs and pricing, to introduce energy-efficient technologies in the overhaul of apartment buildings, as well as work to reduce the number of accidents in heat supply systems.

**Keywords:** energy efficiency, energy consumption, energy intensity, principal component analysis

### ***Введение***

Актуальность темы исследования: одним из важнейших векторов социально-экономического развития России является повышение уровня энергоэффективности и энергосбережения, что способствует рациональному использованию энергетических ресурсов, повышению энергетической безопасности, снижению негативного воздействия на окружающую среду и повышению инновационного потенциала развития различных отраслей экономики страны. Для данной цели разрабатываются федеральные и региональные долгосрочные целевые программы энергосбережения, в которых определяются целевые показатели энергоэффективности и комплекс мер, направленных на их достижение [7].

Из-за отраслевой специализации и особенностей климата Иркутская область относится к регионам с высоким энергопотреблением. Предприятия топливно-энергетического комплекса формируют более 50% объема промышленной продукции в области, что приводит к значительному потреблению топливно-энергетических ресурсов. Поэтому повышение энергоэффективности становится одним из ключевых факторов для обеспечения устойчивого развития региона [5].

Цель исследования: выявить взаимосвязи целевых показателей с использованием метода главных компонент.

### ***Методическая часть***

Метод главных компонент представляет собой эконометрический механизм анализа данных, применяющийся для уменьшения размерности пространства и линейной аппроксимации изучаемых наблюдений.

Пространство  $Z$  представляется как линейная комбинация стандартизированных исходных переменных и коэффициентов, отражающих вклад  $X$  в  $Z$ . Преобразование имеет следующий вид:

$$z_j = \sum_{i=1}^n \delta_{ji} x_i, \quad i = \overline{1, k}$$

где  $z_j$  – главная компонента ( $j = \overline{1, m}$ );  $x_i$  – стандартизированная исходная переменная,  $\delta_{ji}$  – весовой коэффициент, отражающий долю переменной  $x_i$  в главной компоненте  $z_j$  [2].

### ***Результаты расчетов***

Энергоемкость экономики региона рассчитывается как отношение потребления топливно-энергетических ресурсов к ВРП. Энергоёмкость является одним из важных факторов, которые определяют состояние развития промышленности, поскольку иллюстрирует структуру экономики, технологические и финансовые ресурсы, темпы экономического роста, инвестиционную активность, состояние основных производственных фондов, а также ценообразование на рынке энергоресурсов. Помимо этого, анализируя показатель энергоёмкости в динамике,

можно отследить направление и скорость развития различных отраслей экономики. Поэтому энергоёмкость представляет собой актуальный предмет научных исследований [10].

Для проведения анализа в качестве исходных данных из *государственной программы Иркутской области «Развитие жилищно-коммунального хозяйства и повышение энергоэффективности Иркутской области»* [1] были отобраны количественные целевые показатели и планируемые расходы на мероприятия, связанные с повышением энергоэффективности Иркутской области.

Матрица исходных данных была нормирована и центрирована для дальнейших расчетов, так как исходные данные были представлены в разных единицах измерения. Вычисления главных компонент производилось с помощью программы R, предназначенной для анализа и визуализации многомерных данных.

Расчетные значения главных компонент представлены на рисунке 1. Они не интерпретируются прямо [12] и используются далее для расчета коэффициентов корреляции между главными компонентами и показателем энергоёмкости ВРП ИО.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
[1, ]	-2.8819	3.4064	1.4239	-0.9664	0.1770	0.3082	0
[2, ]	-1.9964	0.9220	-0.3025	1.3115	-1.2317	-0.6040	0
[3, ]	-2.5399	-0.4417	-1.9237	0.0151	1.2181	-0.4283	0
[4, ]	-1.1966	-2.6416	-0.8353	-0.6538	-0.7163	1.0205	0
[5, ]	0.3985	-3.2507	2.1156	-0.1508	0.2749	-0.6041	0
[6, ]	3.1044	0.7877	0.3914	1.5554	0.6189	0.7555	0
[7, ]	5.1120	1.2177	-0.8694	-1.1110	-0.3409	-0.4478	0

Рис. 1. Результаты расчета главных компонент

Основные статистические характеристики ГК можно представить в виде сводных показателей.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Standard deviation	3.0578	2.3201	1.4084	1.06127	0.82866	0.68565	2.019e-16
Proportion of Variance	0.4921	0.2833	0.1044	0.05928	0.03614	0.02474	0.000e+00
Cumulative Proportion	0.4921	0.7754	0.8798	0.93912	0.97526	1.00000	1.000e+00

Рис. 2. Основные характеристики главных компонент

На рисунке 3 показаны вклады каждой компоненты в общую дисперсию исходного набора данных. С его помощью подтверждается, что при наличии 7 главных компонент наиболее значимые вклады вносят первые две главные компоненты.

Согласно критериям определения оптимального количества главных компонент, которые стоит рассматривать для анализа, в данном случае будет достаточно первых двух главных компонент [4].

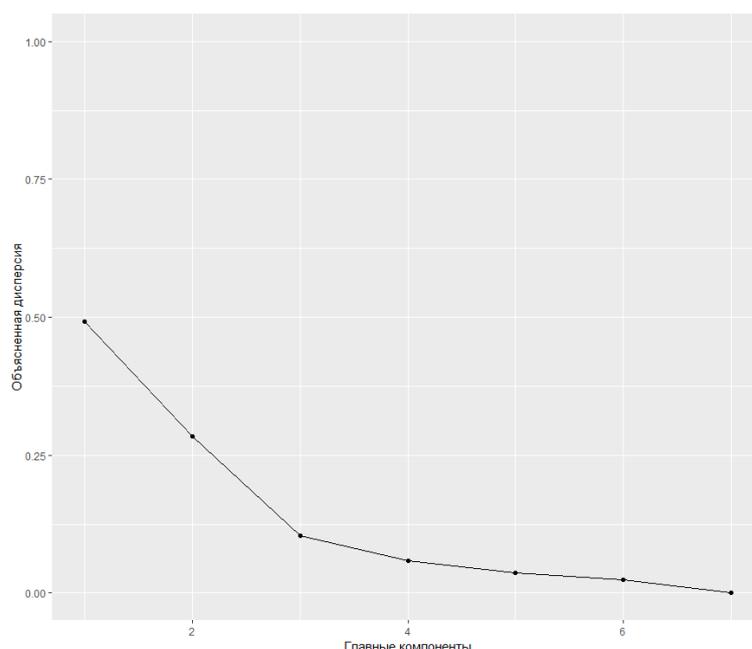


Рис. 3. Объясняемая главными компонентами дисперсия исходных данных

Коэффициент корреляции между первой главной компонентой и динамикой энергоёмкости ВРП ИО довольно высокий (-0.8), что свидетельствует об их высокой взаимосвязанности. Корреляция для второй главной компоненты равна (0.57), третьей главной компоненты – (0.0077). Первая главная компонента включает в себя максимальный набор показателей, связанных с мероприятиями по снижению энергоёмкости ВРП [12].

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
x1	0.2903	-0.0121	-0.1397	-0.3434	0.0119	-0.2909	0.0707
x2	0.2350	0.0340	-0.2182	-0.4761	-0.3325	-0.3313	0.1709
x3	-0.0011	-0.2731	-0.5089	0.0887	0.3314	-0.0270	0.0339
x4	0.2508	0.1547	-0.3228	-0.0179	0.2662	-0.2412	-0.3557
x5	-0.3063	0.1382	0.0565	0.0077	-0.1353	-0.0452	0.4993
x6	-0.2848	0.0689	-0.2691	-0.0845	-0.2544	0.2056	-0.4983
x7	0.2873	0.1421	-0.0805	0.2989	-0.0918	0.0253	0.1426
x8	0.1790	0.2113	0.1517	-0.5164	-0.0589	0.4875	-0.0063
x9	-0.2882	0.1508	-0.1788	-0.0128	-0.2316	-0.0265	-0.2361
x10	-0.2282	-0.2952	0.1064	-0.1391	0.0108	-0.0010	-0.1883
x11	0.1407	-0.3805	0.0573	-0.0925	0.0944	0.1684	0.0032
x12	0.0693	-0.4078	0.1324	-0.1323	0.0710	0.0677	-0.0975
x13	-0.2914	0.0169	0.2689	-0.0860	0.2403	-0.1674	-0.1035
x14	-0.2010	0.2233	0.0298	-0.3667	0.5342	0.0996	0.1713
x15	-0.2058	-0.1108	-0.4789	-0.1407	0.1542	0.3075	0.1926
x16	0.3093	-0.0153	0.1930	-0.0555	-0.0210	0.2368	-0.2900
x17	-0.0176	0.3959	0.1497	-0.0184	0.3302	-0.2672	-0.2251
x18	0.2904	0.0969	-0.0100	0.2594	0.2483	0.3014	0.0835
x19	-0.0205	-0.4021	0.1956	-0.0775	0.0892	-0.2822	-0.0218

Рис. 4. Матрица весов

С помощью матрицы весов, изображенной на рисунке 4, можно оценить, как начальные переменные входят в рассчитанные главные компоненты. При рас-

смотрении первого столбца можно сказать, что наиболее значимыми факторами являются количество аварий в системах теплоснабжения, строительство и модернизация энергетической инфраструктуры (электросетевого хозяйства и теплоснабжения), потребление природного газа. Объединяя эти факторы, можно сказать, что первая главная компонента включает факторы, связанные с инфраструктурной составляющей региональной энергетики и потреблением природного газа.

Во вторую главную компоненту наибольший вклад вносят госконтроль в сфере строительства, госрегулирование тарифов и ценообразования и капремонт многоквартирных домов. То есть, вторая ГК включает в себя строительство (как один из самых энергоёмких секторов экономики) и ценовое регулирование.

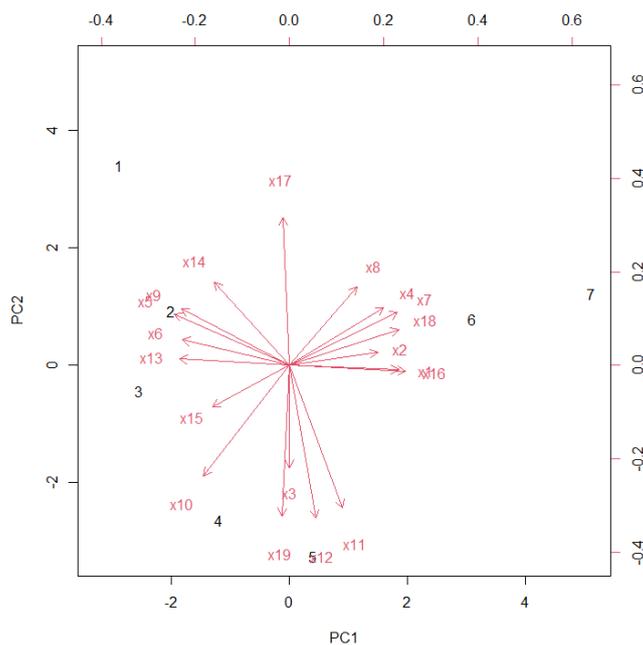


Рис. 5. Проекция данных на оси первой и второй главных компонент

На рисунке 5 красным цветом изображены исходные наблюдения в векторном виде в осях первой и второй главных компонент, с помощью чего подтверждаются описанные ранее вклады первоначальных наблюдений в эти компоненты.

Таким образом, для достижения плановых показателей снижения энергоёмкости ВРП Иркутской области, рекомендуется обратить большее внимание на показатели, вносящие наибольший вклад в первые две главные компоненты, а именно, необходимо стимулировать и расширять строительство и модернизацию энергетической инфраструктуры, потребление природного газа, госконтроль в сфере строительства, госрегулирование тарифов и ценообразования, внедрять энергоэффективные технологии при осуществлении капремонта многоквартирных домов, а также работать над снижением количества аварий в системах теплоснабжения.

## *Благодарности*

Исследование выполнено за счет проекта ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0013 по программе ФНИ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О внесении изменений в государственную программу Иркутской области «Развитие жилищно-коммунального хозяйства и повышение энергоэффективности Иркутской области» на 2019 - 2024 годы [Электронный ресурс]: постановление правительства Иркутской области от 18.12.2020 года № 1098-пп // Официальный интернет-портал правовой информации.
2. Айвазян С. А. и др. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. Финансы и статистика. – 1989.
3. Валитов Ш. М. и др. Системный анализ индикаторов долгосрочной целевой программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности в Республике Татарстан // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2013. №. 4. С. 160-168.
4. Поляк Б.Т. и др. Метод главных компонент: робастные версии // Автомат. и телемех., 2017, № 3, С. 130–148.
5. Санеев Б. Г. и др. Энергоэффективность Иркутской области-потенциал роста //iPolytech Journal. – 2018. – Т. 22. – №. 6 (137). – С. 152-168.
6. Санеев Б. Г. и др. Экологическая оценка применения инноваций в энергетике региона (на примере Иркутской области) //Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. Экология. – 2020. – Т. 22. – №. 1. – С. 95-107.
7. Соколов М. М. Энергоемкость экономики России и основные факторы, воздействующие на ее уровень и динамику //Экономика промышленности/Russian Journal of Industrial Economics. – 2023. – Т. 16. – №. 1. – С. 34-50.
8. Тимонина В. И. Энергосбережение и энергоэффективность как показатели достижения энергобезопасности в стране //Теоретическая экономика. – 2022. – №. 1 (85). – С. 111-119.
9. Токарев Ю. А., Горбунова О. А. Сущность и основные детерминанты региональной энергоэффективности экономики в России // Экономика и предпринимательство. – 2023. – №. 4 (153) – С. 602-606.
10. Швецов А. В., Швецова Н. К. Энергоемкость и энергоэффективность отечественной экономики в контексте социально-экономического развития регионов //Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». – 2023. – Т. 9. – №. 4. – С. 451-461.
11. Физическая и социально-экономическая география Иркутской области: Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) [электронный ресурс]. URL: <https://geoirkobl.irkutsk.ru/161TAK.html> (дата обращения: 19.04.2024).
12. RPubS: Метод главных компонент [электронный ресурс]. URL: <https://rpubs.com/Al-laT/pca-contd> (дата обращения: 11.04.2024).

© В. Е. Морозова, И. В. Проворная, 2024

*Д. В. Подолякин*<sup>1\*</sup>, *М. В. Мишенин*<sup>1,2</sup>

## **Современное состояние теплофикации в отдаленных регионах страны**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация,

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

\*e-mail: d.podolyakin@g.nsu.ru

**Аннотация.** В работе исследовано современное состояние теплофикации в Мурманской области и Камчатском крае. Была посчитана стоимость получения тепловой энергии потребителями при использовании различных методов отопления в Мурманске и Петропавловске-Камчатском. Самыми неэффективными методами оказались: электрообогрев, центральное отопление и дизельное топливо. Основной причиной неэффективности послужил постоянный рост цен на топливо, электроэнергию и отопление в арктических регионах России, который приводит к значительным затратам. Наиболее выгодными оказались каменный уголь и дрова, а также использование сжиженного газа при отоплении бойлерами. Для крупных предприятий оптимальным может оказаться получение тепловой энергии с помощью тепловых насосов, т.к. этот способ характеризуется высокими капитальными затратами, сопровождающимися высокой эффективностью производства тепловой энергии.

**Ключевые слова:** тепловая энергия, газификация, отопление

*D. V. Podolyakin*<sup>1\*</sup>, *M. V. Mishenin*<sup>1,2</sup>

## **The current state of heating in remote regions of the country**

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Novosibirsk, the Russian Federation

\* e-mail: d.podolyakin@g.nsu.ru

**Abstract.** The work examines the current state of district heating in the Murmansk region and Kamchatka region. The cost of obtaining thermal energy by consumers using various heating methods in Murmansk and Petropavlovsk-Kamchatsky was calculated. The most ineffective methods were: electric heating, central heating and diesel fuel. The most profitable were coal and firewood and the use of liquefied gas for heating with boilers.

**Keywords:** thermal energy, gasification, heating

### ***Введение***

Отдаленные регионы России часто сталкиваются с проблемами в области тепловой энергетики из-за сложностей с транспортировкой топлива и обеспечением энергоресурсами. Недоступность месторождений природного газа или

угля, а также длительные расстояния до центров энергоснабжения делают системы теплофикации в этих регионах менее эффективными и дорогостоящими. Анализ состояния теплоэнергетики данных регионов поможет способствовать развитию инфраструктуры и улучшению качества жизни местных жителей.

Целью работы является изучение особенностей теплофикации отдаленных регионов России с применением методологии экономической оценки теплоснабжения индивидуальных жилых домов. Для ее достижения были поставлены следующие задачи:

1. Исследование и сравнительный анализ существующей системы теплофикации Камчатского края и Мурманской области.

2. Применение метода оценки стоимости получения тепловой энергии потребителями при отоплении индивидуальных жилых домов и сравнение полученных результатов.

3. Оценка полученных результатов и рекомендации для дальнейшего развития отрасли.

### ***Методы и материалы***

В рамках проекта строительства частного дома мы исследуем затраты на получение тепловой энергии с использованием различных методов, таких как электрообогрев, тепловые насосы, жидкотопливные бойлеры, твердотопливные печи и центральное водяное отопление.

Мы примем 1 МДж в качестве результирующего показателя для оценки эффективности тепловой энергии для каждого потребителя. Для сравнения обогревательных систем во времени мы будем использовать переменную  $X$  (количество МДж). Оценка экономической выгоды будет включать как текущие, так и капитальные затраты на покупку отопительных систем с условной теплопроизводительностью в 1 кВт [2]. На основании полученных результатов можно провести анализ обогревательных систем. Для сравнения расчетов фокус будет сделан на Камчатский край и Мурманскую область, учитывая их колебания цен на теплоснабжение на момент апреля 2024 года.

1. Отопление с помощью электрообогрева [1]:

2.

$$\mathcal{E} = \mathcal{U}Z_{\text{кп}} + X \frac{T}{3,6}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{U}Z_{\text{кп}}$  – стоимость приобретаемого потребителем оборудования, руб.;

$T$  – тариф на электроэнергию, руб./кВт·час;

3,6 – коэффициент, переводящий кВт·час в МДж.

3. Отопление с помощью теплового насоса (ТНУ):

$$\text{ТНУ} = \mathcal{U}Z_{\text{кп}} + X \frac{T}{3,6\epsilon}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{U}Z_{\text{кп}}$  – стоимость оборудования и его установки, руб.;

$T$  – тариф на электроэнергию, руб./ кВт·час;  
 $c$  – тепловой коэффициент преобразования.

4. Отопление с помощью жидкотопливных бойлеров [3]:

$$ЖТ = УЗ_{КП} + \frac{ХЦ_T}{\rho_T \cdot КПД_{жк} \cdot ТС_T} \times 1000, \quad (3)$$

где  $УЗ_{КП}$  – стоимость оборудования на жидком топливе, руб.;

$Ц_T$  – стоимость топлива, руб./м<sup>3</sup>;

$\rho_T$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;

$КПД_{жк}$  – КПД жидкотопливного котла;

$ТС_T$  – теплотворная способность топлива, кДж/кг.

5. Отопление с помощью твердого топлива [4]:

$$ТТ = УЗ_{КТ} + \frac{ХЦ_T}{\beta \cdot \rho_T \cdot КПД_{тк} \cdot ТС_T} \times 1000, \quad (4)$$

где  $УЗ_{КТ}$  – стоимость оборудования на твердом топливе, руб.;

$Ц_T$  – стоимость топлива, руб./м<sup>3</sup>;

$\rho_T$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;

$КПД_{тк}$  – КПД печи;

$ТС_T$  – теплотворная способность топлива, кДж/кг;

$\beta$  – коэффициент плотности укладки твердого топлива.

6. С помощью центрального отопления [2].

Расчет стоимости тепловой энергии при использовании центрального отопления является достаточно трудным. При покупке недвижимости, в его стоимость уже включено центральное водяное отопление, поэтому величина капитальных затрат равна нулю.

Воспользуемся формулой Ньютона для расчёта удельной теплоемкости для 1 м<sup>2</sup> наружной стены:

$$Q = g \cdot h, \quad (5)$$

где  $g$  – коэффициент теплопередачи, который рассчитывается по формуле

$$g = \frac{1}{\frac{1}{f_1} + \frac{k}{y} + \frac{1}{f_2}}, \quad (6)$$

где  $f$  – коэффициент теплоемкости для поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·°С):  $f_1$  – для внутренней,  $f_2$  – для внешней поверхностей;

$k$  – ширина стены, м;

$y$  – коэффициент теплопроводности материалов стен, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

### **Результаты и обсуждение**

В ходе анализа выяснилось, что в Петропавловске-Камчатском наиболее экономичным видом топлива для отопления частного дома является каменный

уголь для печи, либо немного менее выгодными оказываются дрова. Следует отметить, что в долгосрочной перспективе использование тепловых насосов как источника тепла является достаточно выгодным для потребителей. Однако важно учитывать удельные капитальные затраты, поскольку стоимость и установка тепловых насосов требуют значительных финансовых вложений, и эффективность использования этого оборудования окупается лишь через длительный период времени.

Для наглядного отображения результатов мы создадим сводные графики (рис.1), на которых ось  $x$  будет отражать количество потребляемой энергии (МДж) во времени при постоянной потребляемой мощности 1 кВт, а ось  $y$  будет показывать удельные капитальные затраты для потребителей. Предположим, что в течение года на объекте потребляется 15000 МДж. При  $x = 0$  будут отображены начальные значения, которые представляют собой капитальные затраты на приобретение оборудования потребителями для обеспечения теплоснабжения.

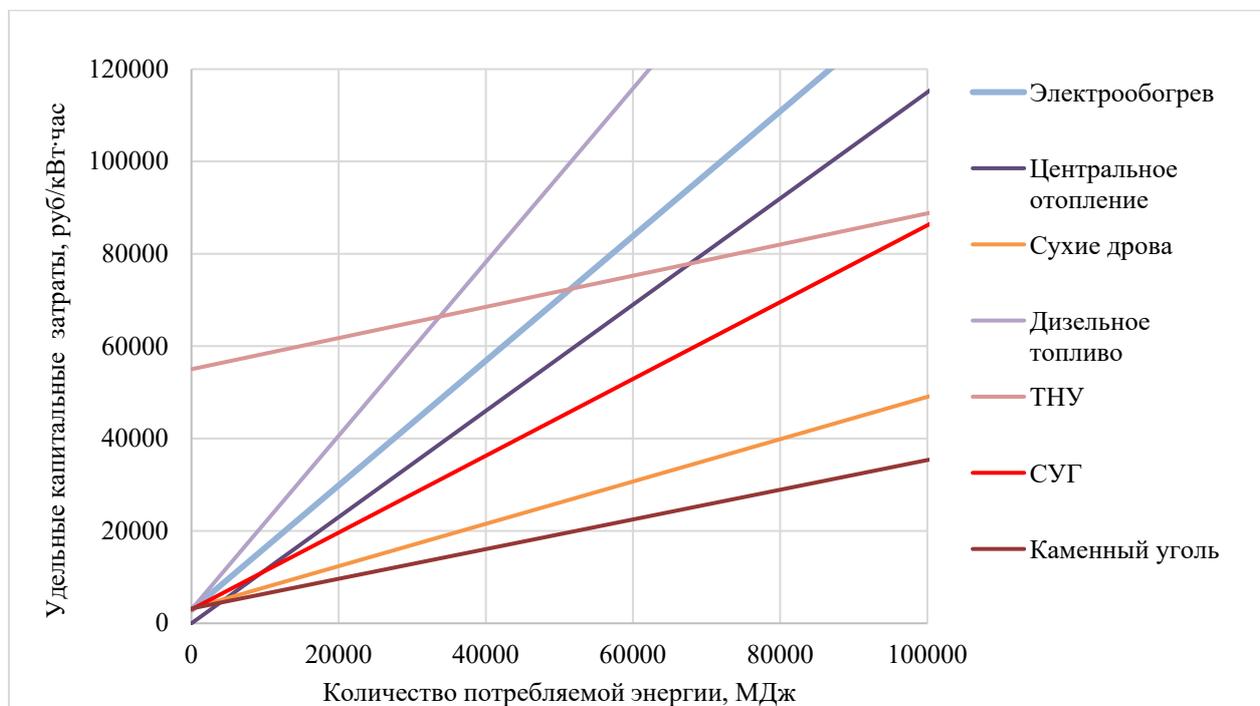


Рис. 1. Графическая интерпретация экономической эффективности основных способов получения тепловой энергии для потребителей в Камчатском крае.

*Источник: построено автором на основе расчетов*

Далее на рис. 2 представлена информация об экономической эффективности способов получения тепловой энергии для потребителей Мурманска.

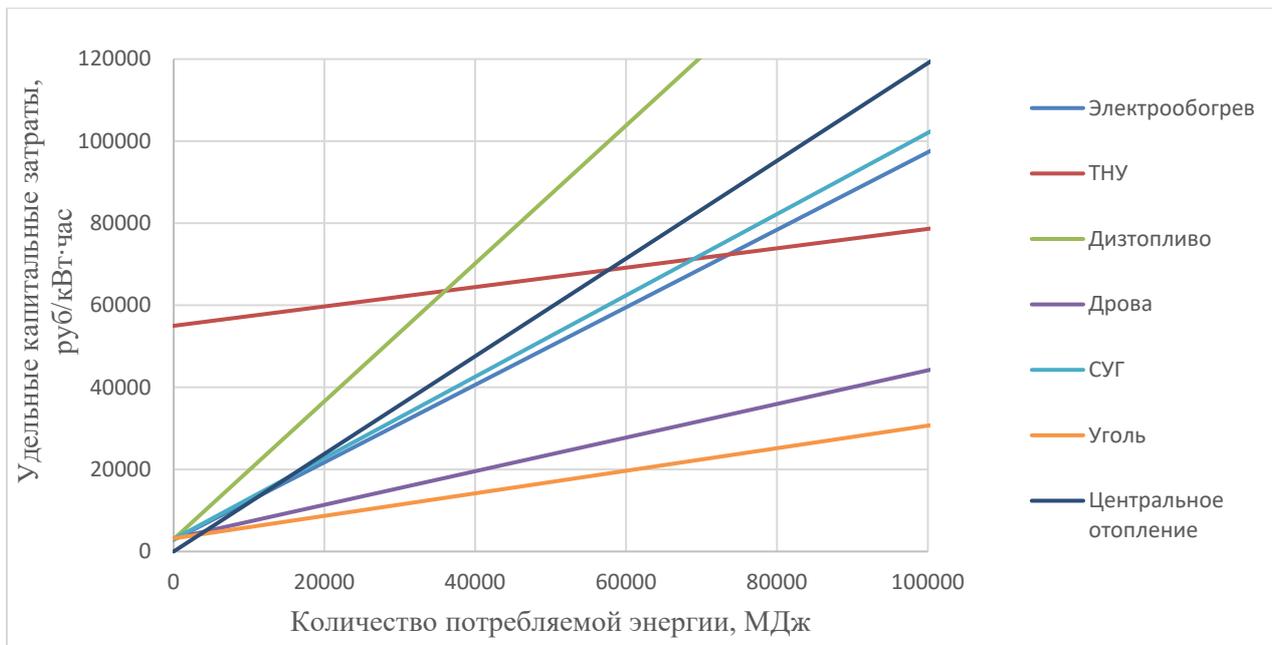


Рис. 2. Графическая интерпретация экономической эффективности основных способов получения тепловой энергии для потребителей в Мурманской области. *Источник: построено автором на основе расчетов*

### Заключение

В результате проведенных расчетов можно выделить некоторые рекомендации. Несмотря на то, что использование твердого топлива требует определенных усилий по его хранению, загрузке и очистке отходов, эти неудобства компенсируются его экономической выгодой и надежностью. Для двух регионов в данном случае твердое топливо оказывается наиболее экономически выгодным для отопления частного дома. Однако каждый выбор топлива для отопления имеет свои особенности, и важно учитывать все аспекты перед принятием решения о наиболее подходящем способе обогрева дома.

1. Тепловые насосы имеют самые высокие удельные капитальные затраты, однако их эффективность видна из графиков, где угол наклона прямой ниже, чем у других систем, таких как электрообогрев, дизельные бойлеры и центральное водяное отопление. Этот метод может быть оптимальным для крупных предприятий, которые потребляют большие объемы энергии, способные быть восстановлены и повторно использованы.

2. Использование дизельных и газовых бойлеров, электрообогревателей и центрального отопления является наименее эффективным среди всех рассмотренных методов. Постоянный рост цен на топливо, электроэнергию и отопление в арктических регионах России приводит к значительным расходам на эти виды отопления для частных домовладельцев.

3. Для частных потребителей наиболее эффективным способом отопления дома является использование твердотопливных печей с сухими дровами и каменным углем. По капитальным затратам этот метод не сильно отличается от других,

за исключением тепловых насосов. Однако по стоимости производства тепловой энергии он превосходит электрообогрев, дизельные и газовые бойлеры, а также центральное водяное отопление.

### *Благодарности*

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-78-10156, <https://rscf.ru/project/23-78-10156/>.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. Р. Хафизова, С. А. Лившиц, Н. А. Юдина. Особенности и экономическая оценка индивидуальной системы отопления // *Современные технологии и экономика энергетики*. – 2021. – с. 49-51.
2. Ляндзберг А. Р. Особенности теплофикации Камчатского края // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. – 2006. – №. 5. – С. 79-82.
3. Набиулин Р. М., Ямлеева Э. У. Сравнение экономичности использования различных видов топлива для отопления. *Новые технологии в теплоснабжении и строительстве*. – 2017. – С. 13 – 15.
4. Орлов А. Ю., Осипов В. А. Об использовании природного газа для отопления объектов жилищного фонда. *Потенциал устойчивого развития: концепции, модели и практическое приложение*. – 2024. – С. 94 – 100.

© Д. В. Подолякин, М. В. Мишенин, 2024

*К. С. Саблин<sup>1\*</sup>, Е. В. Гоосен<sup>1</sup>, О. К. Гоосен<sup>1</sup>*

## **Роль государства в цепочках создания стоимости в угольной отрасли**

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,  
г. Кемерово, Российская Федерация  
\* e-mail: sablin\_ks@mail.ru

**Аннотация.** Современная экономика представляют собой переплетение глобальных и национальных цепочек создания стоимости (ЦСС). В мировой науке и практике растет понимание, что именно ЦСС являются средством анализа организации и инструментом развития отраслей и регионов. Данная статья носит обзорный характер и посвящена изучению современных подходов к роли государства в глобальных и национальных ЦСС в угольной отрасли. В статье выделено три современных подхода к изучению роли государства в развитии и трансформации ЦСС: «государственно-центричный», анализ роли и особенностей участия государственных фирм в ЦСС, анализ тенденций расширения сфер и форм государственного контроля за ЦСС. На основе первого и третьего подходов предложен авторский подход к трансформации ЦСС в угольной отрасли.

**Ключевые слова:** угольная отрасль, цепочки создания стоимости, роль и функции государства в ЦСС

*K. S. Sablin<sup>1\*</sup>, E. V. Goosen<sup>1</sup>, O. K. Goosen<sup>1</sup>*

## **The role of the state in value chains in the coal industry**

<sup>1</sup>Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS,  
Kemerovo, Russian Federation  
\* e-mail: sablin\_ks@mail.ru

**Abstract.** Modern economies are an interweaving of global and national value chains (VCs). There is a growing understanding in world science and practice that they are a means of analyzing an organization and a tool for the development of industries and regions. This article is of a review and is devoted to the study of modern approaches to the role of the state in global and national VCs in the coal industry. The article highlights three modern approaches to studying the role of the state in the development and transformation of VC chains: “state-centric”, analysis of the role and features of the participation of state-owned firms in VCs, analysis of trends in expanding the spheres and forms of state control over VCs. Based on the first and third approaches, the author’s approach to transformation into a centralized social network in the coal industry is proposed.

**Keywords:** coal industry, value chains, the role and functions of the state in the VCs

### ***Введение***

Современная экономика представляют собой переплетение глобальных и национальных цепочек создания стоимости (ЦСС): глобальных - ГЦСС и национальных - НЦСС. В мировой науке и практике растет понимание, что именно они

являются средством анализа организации и инструментом развития отраслей и регионов [1,2]. Центральное место в ЦСС занимают влиятельные транснациональные корпорации – так называемые «глобальные ведущие фирмы», которые являются движущей силой развития отраслей во всем мире. Участие страны в таких цепочках создания стоимости может как ускорять ее развитие за счет внедрения технологий, обучения и повышения потенциала развития национальных компаний-поставщиков и территорий, так и тормозить их развитие [3]. Поэтому в современных условиях активно продвигается промышленная и торговая политика, опирающаяся на цепочки создания стоимости. Успешность их реализации во многом зависит от роли государства в этих цепочках [4-7].

В текущих условиях российская угольная отрасль находится в состоянии кризиса, как и весь добывающий сектор, ориентированный длительное время на экспорт ресурсов. Одна из самых острых проблем, которую в ближайшее время предстоит решить, как адаптировать отечественную угольную отрасль к санкциям и энергопереходу и сделать ее более устойчивой к ужесточению экологических требований и обострению геополитической ситуации. Для решения этих проблем необходимо понять какую роль может сыграть государство в политике трансформации отрасли. При этом эта политика должна опираться на ЦСС, сложившиеся в отрасли.

### ***Методы и материалы***

Авторы ставят перед собой цель: определение роли государства в развитии и трансформации цепочек в отечественной угольной отрасли. Данная статья носит обзорный характер, посвящена изучению современных подходов к роли государства в ГЦСС и НЦСС с акцентом на угольную отрасль.

### ***Результаты***

Длительное время в научных исследованиях государство полностью отсутствовало в повестке ГЦСС и НЦСС либо его участие было пассивным содействием привлечению инвестиций ведущих фирм [8,9]. «Хотя в литературе, посвященной глобальным цепочкам создания стоимости, в явной форме не выражается скептицизм или враждебность по отношению к государству, как участнику ЦСС, тем не менее его роли как фактору развития ... цепочек создания стоимости уделяется значительно меньше внимания по сравнению с тем, как показана роль ведущих фирм в качестве проводников модернизации в большинстве стран мира» [10].

Сначала финансовый кризис 2008, энергетический кризис 2014 и в наибольшей степени кризис пандемии Ковид-2019 привели к возврату государства и его роли в ЦСС в экономику и сферу анализа [11-14]. До последнего времени изучение ЦСС шло на примере добывающих отраслей, где ведущую роль играли компании развитых стран. Однако формирование ГЦС и НЦС в добывающих отраслях России, Китая, Индии, Вьетнама показало, что государства должны играть более активную роль, особенно в защите национальных интересов в энергетическом секторе [15-17]. Для успешного устойчивого развития угольных отраслей

таких стран требуется более активное участие государства в создании и управлении ГЦС и НЦС.

Сейчас в литературе можно увидеть три основных направления изучения роли государства в ЦСС: (1) переход от «фирма ориентированного» подхода к «государственно-центричному» анализу ЦСС [11, 18-20]. В рамках этого направления выделены ключевые функции государства в ЦСС: стимулирование, регулирование, организация производства, создание рынков и покупка продукции (см. табл.1); (2) анализ роли и особенностей участия государственных фирм в ЦСС, преимущества и риски их участия в ГЦСС в качестве ведущих фирм [21]; (3) изучение тенденций расширения сфер и форм государственного контроля за ЦСС [22].

Таблица 1

Ключевые функции государства в ЦСС

Функция	Определение	Примеры
Стимулирование	Помощь фирмам в ЦСС в решении проблем глобальной и национальной экономики	Налоговые льготы, субсидии, ОЭЗ, стимулы для НИОКР, торговая политика, межгосударственное лоббирование, региональные субсидии
Регулирование	Меры, регулирующие и ограничивающие деятельность фирм внутри ЦСС	Контроль цен, ограничения на иностранные инвестиции, торговая политика, патентное законодательство, регулирование труда, контроль качества, стандарты
Организация производства	Государственные компании, конкурирующие за долю рынка с другими фирмами	Государственные компании (нефтяная и горнодобывающая промышленность).
Создание рынков	Государственные закупки продукции фирмы	Государственные закупки, содействие экспорту

Источник: адаптировано авторами на основе [11].

В последнее время в исследованиях, посвященных особенностям ЦСС в добывающих и энергетических отраслях, поднимается проблема роли государства в управлении такими цепочками, в том числе в контексте энергоперехода [16,17, 23-26].

Это привело к более взвешенному исследованию роли государства в цепочках создания стоимости и показало возможности использования этого опыта для трансформации отечественных ЦСС в угольной отрасли и обоснованию его ключевых функций в ЦСС. При этом выбор конкретных функций зависит от таких факторов как: уровень развития страны и рынков; место страны в ГЦСС и его динамика (upgrade/downgrade); наличие в стране политики, ориентированной на создание и поддержание/трансформацию оптимальных ЦСС (VC-oriented state policies); отраслевые особенности ЦСС [27].

## Обсуждение

Особенности участия государства в угольных цепочках создания стоимости во многом определяются отраслевыми особенностями ЦСС. В первую очередь это ресурсно-сырьевой характер ЦСС в угольной отрасли по таксономии Павитта (Pavitt's taxonomy) [27]. Добыча угля находится в самом начале цепочки, уголь является отправной точкой ЦСС, которые включают в себя подготовку проекта (геологоразведка, проектирование и строительство угледобывающего предприятия), добычу (в том числе обогащение), логистику и продажи. Цепочки создания стоимости в угольной отрасли формируются на основе аддитивного производства, представляющего собой жесткую последовательность технологических операций, при этом НИР и снабжение в состав цепочек не входят. Поэтому ЦСС в угольной отрасли короткие, тонкие (lean) и не гибкие [24].

ЦСС в угольной отрасли относятся к цепочкам, управляемым покупателем (buyer-driven chain) [11] и формируются сверху вниз (backward integration) [28]. Цепочки в угольной отрасли пространственно привязаны к месту локализации угольных запасов и ключевых потребителей, основным источником добавленной стоимости в ЦСС является природная и монопольная рента, формирующаяся за счет разницы в качестве, местоположении угольных месторождений и способности компаний, входящих в ЦСС, контролировать рынок. Поэтому ЦСС в угольной отрасли носят закрытый анклавный характер [23] и создают риски ресурсного проклятия в регионах базирования. В сочетании со значительной капиталоемкостью угледобычи это приводит к относительно слабой восприимчивости ЦСС в угольной отрасли к инновациям и ориентации их на преимущественно экстенсивный характер развития.

Эти особенности цепочек в угольной отрасли объясняют их основной риск - подверженность внешним шокам. В табл. 2 показана оценка подверженности шокам ЦСС в отдельных отраслях в период кризиса 2019-2020 гг. Угольная отрасль имеет один из самых высоких рангов уязвимости. Именно поэтому институты, государство и гражданское общество так важны в обеспечении их стабильности.

Таблица 2

Подверженность шокам 10 основных глобальных ЦСС  
(1 – максимальный ранг уязвимости)

Отраслевая ЦСС	Ранг	Отраслевая ЦСС	Ранг
Коммуникационное оборудование	1	Горная промышленность	6
Производство одежды	2	Компьютеры и электроника	7
Нефтехимия	3	Текстильная промышленность	8
<b>Угольная промышленность</b>	<b>4</b>	Аэрокосмическая промышленность	9
Транспортное оборудование	5	Полупроводниковая промышленность	10

Источник: [24, 29]

Важнейшими ориентирами трансформации ЦСС в угольной отрасли в направлении повышения их устойчивости могут стать: создание новых и более сложных продуктов на основе продуктов и отходов угледобычи (товарный и рыночный апгрейд ЦСС); переход на более глубокую переработку угля (функциональный апгрейд) на основе технологий глубокой переработки; переход к добыче угля, позволяющей избежать или уменьшить ущерб окружающей среде в том числе выбросов CO<sub>2</sub> (экологическая модернизация). По мнению авторов эти направления не только позволят сделать ЦСС в угольной отрасли более эффективными, но и позволят повысить их стрессоустойчивость.

### ***Заключение***

Обзор современной литературы позволяет сделать вывод, что в современных непростых условиях государство играет все большую роль в ЦСС. Угольные ЦСС обладают целым рядом особенностей, которые делают необходимым прямое или косвенное участие государства как в их стабилизации, так и модернизации. При этом среди выявленных функций государства наибольшую роль играют те, которые направлены на повышение устойчивости ЦСС к внешним шокам.

### ***Благодарности***

Исследование выполнено в рамках проекта «Зеркальные лаборатории» НИУ «Высшая школа экономики» по теме «Трансформации цепочек создания стоимости угольной отрасли и связанных с ней отраслей в условиях глобального энергоперехода и санкционного давления на российскую экономику» (Соглашение № 6.13.1-02/210723–1 от 21.07.2023 г.).

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Mayer F., Gereffi G. International development organizations and global value chains //Handbook on global value chains. – Edward Elgar Publishing, 2019. – P. 570-584.
2. De Marchi V. et al. Nurturing international business research through global value chains literature: A review and discussion of future research opportunities //International Business Review. – 2020. – vol. 29. – №. 5. – P.101708.
3. Gereffi G. Global value chains and development: Redefining the contours of 21st century capitalism. – Cambridge University Press, 2018.
4. Ponte S., Ewert J. Which way is “up” in upgrading? Trajectories of change in the value chain for South African wine //World development. – 2009. – vol. 37. – №. 10. – P. 1637-1650.
5. Blažek J. Towards a typology of repositioning strategies of GVC/GPN suppliers: the case of functional upgrading and downgrading //Journal of Economic Geography. – 2016. – vol. 16. – №. 4. – P. 849-869.
6. Blažek J., Csank P. Can emerging regional innovation strategies in less developed European regions bridge the main gaps in the innovation process? //Environment and Planning C: Government and Policy. – 2016. – vol. 34. – №. 6. – P. 1095-1114.
7. Alford M., Phillips N. The political economy of state governance in global production networks: Change, crisis and contestation in the South African fruit sector //Review of International Political Economy. – 2018. – vol. 25. – №. 1. – P. 98-121.
8. Gereffi G. The organization of buyer-driven global commodity chains: How US retailers shape overseas production networks. – 1994.
9. Wade R. H. What strategies are viable for developing countries today? The World Trade Organization and the shrinking of ‘development space’ //Review of international political economy. – 2003. – vol. 10. – №. 4. – P. 621-644.

10. Bair J. Global capitalism and commodity chains: looking back, going forward // *Competition & Change*. – 2005. – vol. 9. – №. 2. – P. 153-180.
11. Horner R. Beyond facilitator? State roles in global value chains and global production networks // *Geography Compass*. – 2017. – vol. 11. – №. 2, e12307. URL: <https://compass.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gec3.12307> (дата обращения: 24.05.2024).
12. Smith A. The state, institutional frameworks and the dynamics of capital in global production networks // *Progress in Human Geography*. – 2015. – vol. 39. – №. 3. – P. 290-315.
13. Pickles J., Smith A. Technologies of Transition: Foreign Investment and the (Re-) Articulation of East Central Europe into the Global Economy 1 // *Foreign direct investment and regional development in East Central Europe and the former Soviet Union*. – Routledge, 2017. – P. 21-37.
14. Alford M., Phillips N. The political economy of state governance in global production networks: Change, crisis and contestation in the South African fruit sector // *Review of International Political Economy*. – 2018. – vol. 25. – №. 1. – P. 98-121.
15. Mayer F. W., Phillips N. Outsourcing governance: States and the politics of a 'global value chain world' // *New political economy*. – 2017. – vol. 22. – №. 2. – P. 134-152.
16. Никитенко С. М., Гоосен Е. В. Цепочки добавленной стоимости как инструмент развития угольной отрасли // *Всероссийский экономический журнал ЭКО*. – 2017. – №. 9 (519). – С. 104-124.
17. Гоосен Е. В., Каган Е. С., Рожков А. А. Стрессоустойчивость российской угольной отрасли в условиях энергоперехода, декарбонизации и экономических санкций // *Горная промышленность*. – 2023. – №S2. – С. 118-125.
18. Werner M. Geographies of production II: Thinking through the state // *Progress in Human Geography*. – 2021. – vol. 45. – №. 1. – P. 178-189.
19. Babic M., Garcia-Bernardo J., Heemskerk E. M. The rise of transnational state capital: State-led foreign investment in the 21st century // *Review of International Political Economy*. – 2020. – vol. 27. – №. 3. – P. 433-475.
20. Haberly D., Wójcik D. Earth incorporated: Centralization and variegation in the global company network // *Economic Geography*. – 2017. – vol. 93. – №. 3. – P. 241-266.
21. Lim K. F. Strategic coupling, state capitalism, and the shifting dynamics of global production networks // *Geography Compass*. – 2018. – vol. 12. – №. 11, e12406. URL: <https://compass.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gec3.12406> (дата обращения: 24.05.2024).
22. Dorn F. M., Huber C. Global production networks and natural resource extraction: adding a political ecology perspective // *Geographica Helvetica*. – 2020. – vol. 75. – №. 2. – P. 183-193.
23. Zhang L. et al. A review of energy industry chain and energy supply chain // *Energies*. – 2022. – vol. 15. – №. 23. – P. 9246.
24. Кондратьев В. Б., Попов В. В., Кедрова Г. В. Трансформация глобальных цепочек стоимости: опыт трех отраслей // *Мировая экономика и международные отношения*. – 2020. – Т. 64. – №. 3. – С. 68-79.
25. Andersen A. D., Marín A., Simensen E. O. Innovation in natural resource-based industries: a pathway to development? Introduction to special issue // *Innovation and Development*. – 2018. – vol. 8. – №. 1. – P. 1-27.
26. Molina O. Innovation in an unfavorable context: local mining suppliers in Peru // *Resources Policy*. – 2018. – vol. 58. – P. 34-48.
27. Pavitt K. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory // *Research policy*. – 1984. – vol. 13. – №. 6. – P. 343-373.
28. Del Prete D., Rungi A. Backward and forward integration along global value chains // *Review of Industrial Organization*. – 2020. – vol. 57. – P. 263-283.
29. Nikitenko S. M., Filimonova I. V., Provornaya I. V., Goosen E. V. Resilience of the global coal sector under exogenous economic shocks. – 2023 – vol. 40. - №2. – P. 47-50.

© К. С. Саблин, Е. В. Гоосен, О. К. Гоосен, 2024

*Н. В. Сальникова<sup>1\*</sup>, И. В. Филимонова<sup>1,2</sup>*

## **Роль нефтегазовых компаний на фондовом рынке России**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\*e-mail: n.salnikova1@g.nsu.ru

**Аннотация.** Нефтегазовые компании на фондовом рынке России определяют современные возможности развития экономики и являются основой долгосрочного устойчивого роста. Доля нефтегазовых доходов в структуре российского бюджета составляет более 40%. На российском фондовом рынке доля нефтегазовых компаний составляет около 45-55%. Из-за активного участия нефтегазового сектора России в мировой экономике уровень капитализации компаний этой сферы играет ключевую роль в стабильности функционирования нефтегазового комплекса. Данное исследование направлено на прогнозирование капитализации российских нефтегазовых компаний на основе стоимости акций до 2030 года с использованием интегрированной модели авторегрессии ARIMA. Это может быть полезным для инвесторов, поскольку позволит им получить рекомендации и оценить перспективы инвестирования в данный сектор экономики.

**Ключевые слова:** капитализация, акции, прогноз, нефтегазовые компании, фондовый рынок

*N. V. Salnikova<sup>1\*</sup>, I. V. Filimonova<sup>1,2</sup>*

## **The role of oil and gas companies in the Russian stock market**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Economics and Organization of Industrial Production SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\*e-mail: n.salnikova1@g.nsu.ru

**Abstract.** Oil and gas companies in the Russian stock market define modern economic development opportunities and are the basis for long-term sustainable growth. The share of oil and gas revenues in the structure of the Russian budget is more than 40%. The share of oil and gas companies in the Russian stock market is about 45-55%. Due to the active participation of the Russian oil and gas sector in the global economy, the capitalization level of companies in this area plays a key role in the stability of the oil and gas complex. This study is aimed at forecasting the capitalization of Russian oil and gas companies based on the share price until 2030 using the integrated ARIMA autoregression model. This can be useful for investors, as it will allow them to receive recommendations and assess the prospects for investing in this sector of the economy.

**Keywords:** capitalization, shares, forecast, oil and gas companies, stock market

## ***Введение***

Россия является одним из крупнейших производителей и экспортеров нефти и газа в мире. Деятельность нефтегазовых компаний имеет значительное влияние на валютные доходы страны, бюджетные поступления и общий экономический рост. Акции нефтегазовых компаний обычно составляют значительную часть инвестиционных портфелей российских инвесторов и фондов. Изменения в их курсах могут существенно влиять на финансовое положение инвесторов.

Таким образом, возникает потребность в получении прогноза капитализации или стоимости акций нефтегазовых компаний. Прогнозирование капитализации способствует устойчивому развитию фондового рынка в целом, так как помогает инвесторам принимать обоснованные решения, оценивать риски и возможности инвестирования, а также стимулирует экономический рост и развитие компаний.

Исследованием вопроса о роли нефтегазовых компаний и их капитализации в фондовом рынке России занимались как отечественные, так и зарубежные учёные. Теоретическую и методическую основу исследования о вкладе альтернативных источников составили работы ведущих специалистов (Александрова А.И., Солодкая Т.И., Ярулина Е. Д., Фатхутдинова О. А., Сапрыкин К. А. Mensi W. и др.) [1, 2, 3, 4,5].

Целью исследования является прогнозирование капитализации российских нефтегазовых компаний на основе стоимости акций до 2030 года.

В соответствии с целью были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ теоретических и методических основ структуры фондового рынка России и формирования капитализации компаний;
2. Построение модели временных рядов, позволяющей сделать прогноз капитализации нефтегазовых компаний России до 2030 года;
3. Получение количественных оценок в виде конкретных значений цен акций и размера капитализации, анализ результатов;
4. Формирование выводов о влиянии нефтегазовых компаний на фондовый рынок России и составление рекомендаций для инвесторов.

## ***Методы и материалы***

Для составления прогноза капитализации нефтегазовых компаний России был применён анализ временных рядов с использованием модели ARIMA. Для реализации исследования был составлен следующий алгоритм:

### ***1. Сбор информации, необходимой для проведения исследования***

Для проведения расчётов автором была собрана база данных, состоящая из цен акций нефтегазовых компаний за период 2013-2023 гг. База данных составлена по 7 крупнейшим нефтегазовым компаниям России и содержит в себе по 132 наблюдения на каждую компанию. Рассмотрены следующие компании: ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром», ПАО «НОВАТЭК», ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Газпром нефть», ОАО «Сургутнефтегаз», ПАО «Татнефть».

## 2. Построение модели ARIMA

Для выбора наиболее подходящей модели используются информационные критерии, такие как: AIC, AICc и BIC, рассчитываемые по следующим формулам:

$$AIC = 2k - 2 \ln(L), \quad (1)$$

$$AICc = AIC + 2k \frac{k+1}{n-k-1}, \quad (2)$$

$$BIC = k \cdot \ln(n) - 2 \ln(L), \quad (3)$$

где  $k$  - количество параметров в модели,

$L$  - максимальное значение функции правдоподобия для данной модели,  
 $\ln(L)$  - логарифмическая вероятность,

$n$  - количество наблюдений.

Низкие значения информационных критериев указывают на лучшую модель, которая больше подходит для описания данных.

## 3. Получение прогнозов в виде графиков и их расшифровка

Для каждой компании был построен график с трендом, на основе которого были определены числовые значения прогноза.

## 4. Анализ и интерпретация полученных в ходе расчётов значений

На основе проведенных расчетов был прогноз капитализации для каждой из рассматриваемых компаний, а также даны соответствующие рекомендации для инвесторов.

## Результаты и обсуждение

Четыре из семи компаний демонстрируют стабильный прогноз, который остаётся практически неизменным вплоть до 2030 года, к ним относятся: ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром», ОАО «Сургутнефтегаз», ПАО «Татнефть». Цены акций остальных компаний будут расти, самые сильные изменения ожидаются у ПАО «Газпром нефть» - 63,2%. Прогнозируемые изменения стоимости акций внесены в табл. 1.

Таблица 1

Прогнозируемые значения стоимости акций нефтегазовых компаний на 2024 и 2030 гг.

год	Роснефть	Газпром	НОВАТЭК	ЛУКОЙЛ	Газпром нефть	Сургутнефтегаз	Татнефть
2024	584,06	167,34	1 451,00	7 707,89	854,06	31,50	632,70
2030	584,06	167,34	3 640,95	15 063,05	2 321,57	29,96	632,70
разница, %	0	0	60,1	48,8	63,2	-5,1	0

Источник: составлено автором на основе расчётов

Таким образом, если количество выпущенных акций компаний сохранится на уровне 2023 года, то в 2030 году ожидаются значения капитализации, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Ожидаемое изменение капитализации (млрд руб.) нефтегазовых компаний к 2030 г.

год	Роснефть	Газпром	НОВАТЭК	ЛУКОЙЛ	Газпром нефть	Сургутнефтегаз	Татнефть
2023	4 904,84	3 972,15	4 130,08	3 798,53	2 758,09	973,61	1 041,96
2030	6 189,87	3 961,44	11 055,04	10 436,58	11 007,26	1 070,35	1 378,46
разница, %	20,76	-0,27	62,64	63,60	74,94	9,04	24,41

Источник: составлено автором на основе расчётов

Наряду со стоимостью акций, ПАО «Газпром нефть» является лидером и по капитализации. Согласно прогнозу, она может вырасти на 74,94%. ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «ЛУКОЙЛ» также демонстрируют высокие показатели – 62,64% и 63,6% соответственно. Уменьшение капитализации ожидается только у ПАО «Газпром» - на 0,27%.

Инвесторам в нефтегазовой отрасли важно учитывать, как изменение цен акций, так и капитализацию компании, поскольку обе эти метрики предоставляют различную, но важную информацию при принятии инвестиционных решений. Так, самыми прибыльными будут акции ПАО «Газпром нефть», ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «ЛУКОЙЛ», а самым неоправданным станет вложение в ПАО «Газпром» и ОАО «Сургутнефтегаз». Общие рекомендации внесены в табл. 3. В столбце «рекомендация к инвестированию» первый знак отражает оценку изменения капитализации, а второй – стоимости акций.

Таблица 3

Рекомендации к инвестированию в ведущие нефтегазовые компании России

Компания	Изменение капитализации	Изменение стоимости акций	Рекомендация к инвестированию
Роснефть	20,76	0	+ -
Газпром	-0,27	0	- -
НОВАТЭК	62,64	60,1	++
ЛУКОЙЛ	63,60	48,8	++
Газпром нефть	74,94	63,2	++
Сургутнефтегаз	9,04	-5,1	+ -
Татнефть	24,41	0	+ -

Источник: составлено автором на основе расчётов

### Заключение

Согласно прогнозу капитализации российских нефтегазовых компаний до 2030 года, роль нефтегазового сектора на фондовом рынке России, скорее всего, останется значительной. Однако любой прогноз может быть неточным из-за изменчивости рыночной среды и воздействия внешних факторов. Необходимо учи-

тывать высокую волатильность рынка нефтегазовой промышленности и влияние различных факторов, таких как геополитика, экономика, спрос и предложение на мировых рынках. Для принятия обоснованных инвестиционных решений необходимо учитывать все аспекты, а также быть готовым к возможным неожиданностям и изменению ситуации.

### *Благодарности*

Доклад подготовлен в рамках НИР ИЭОПП СО РАН, проект 5.6.6.4. (0260-2021-0008) "Методы и модели обоснования стратегии развития экономики России в условиях меняющейся макроэкономической реальности".

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александрова А.И. и др. Анализ экономики нефтегазового сектора в РФ // Экономика и экологический менеджмент. – 2019. – №2. – С. 3-14.
2. Солодкая Т. И. и др. Эконометрический анализ влияния структуры финансового рынка на экономический рост Российской Федерации // Изв. Саратов. ун-та Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. – 2019. – Т. 19. – №1. – С. 28–35.
3. Ярулина Е. Д., Фатхутдинова О. А. Управление капитализацией предприятий нефтегазового комплекса // Экономика и предпринимательство. – 2020. – №. 11. – С. 1405-1409.
4. Сапрыкин К. А. Статистический анализ макро-и микроэкономических факторов, влияющих на фондовый рынок России // Вестник Российского экономического университета им. ГВ Плеханова. Вступление. Путь в науку. – 2020. – Т. 10. – №. 3. – С. 66-75.
5. Mensi W. et al. Does oil price variability affect the long memory and weak form efficiency of stock markets in top oil producers and oil Consumers? Evidence from an asymmetric MF-DFA approach // The North American Journal of Economics and Finance. – 2021. – vol. 57. – P. 101446.

© С. Н. Сальникова, И. В. Филимонова, 2024

*А. П. Саматова<sup>1,2\*</sup>, А. В. Филимонов<sup>1,2</sup>*

## **Энергоэффективность отраслей экономики регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

\*e-mail: a.samatova@g.nsu.ru

**Аннотация.** Целью исследования является оценка энергетической эффективности секторов экономики Восточной Сибири и Дальнего Востока. Представлена теоретическая база исследования, на основе которой были осуществлены расчеты, а также интерпретированы результаты. Выделено место России среди самых энергоемких стран мира, подчеркнута значимость результатов политики в области повышения энергетической эффективности на региональном уровне. Выделены особенности регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока, в связи с которыми вопросам, связанным с энергетической политикой, в этих регионах необходимо уделять особое внимание. Показано, что секторы промышленности, транспорта и других видов деятельности являются наиболее энергоемкими, в связи с чем этим секторам нужно уделять большее внимание при проведении политики в области повышения энергоэффективности.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, электроёмкость ВРП, Восточная Сибирь, Дальний Восток

*A. P. Samatova<sup>1,2\*</sup>, A. V. Filimonov<sup>1,2</sup>*

## **Energy efficiency of economic sectors in the regions of Eastern Siberia and the Far East**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Novosibirsk, the Russian Federation

\*e-mail: a.samatova@g.nsu.ru

**Abstract.** The purpose of the study is to assess the energy efficiency of the economic sectors of Eastern Siberia and the Far East. The theoretical basis of the study is presented, on the basis of which calculations were carried out, as well as the results were interpreted. Russia's place among the most energy-intensive countries in the world is highlighted, and the importance of policy results in the field of energy efficiency improvement at the regional level is emphasized. The peculiarities of the regions of Eastern Siberia and the Far East are highlighted, in connection with which special attention should be paid to issues related to energy policy in these regions. It is shown that the sectors of industry, transport and other activities are the most energy-intensive, and therefore these sectors need to be given more attention when implementing energy efficiency policies.

**Keywords:** energy efficiency, electrical capacity of GRP, Eastern Siberia, the Far East

## Введение

Повышение энергетической эффективности является одним из приоритетных направлений государственной политики. С повышением энергетической эффективности растет конкурентоспособность российских товаров, так как сокращаются затраты на энергоресурсы в себестоимости; сокращаются вредные выбросы в атмосферу, а также стабилизируется энергоснабжение, что влияет на уровень жизни населения. Этот процесс особенно важен в текущих условиях нестабильности внешнего рынка, в которых необходимо достигнуть высокого уровня самостоятельности в вопросах энергетики. По данным 2022 г. Россия занимает пятое место среди стран с самой высокой энергоемкостью (рис.1), что подчеркивает важность повышения эффективности использования энергии в ближайшем будущем.

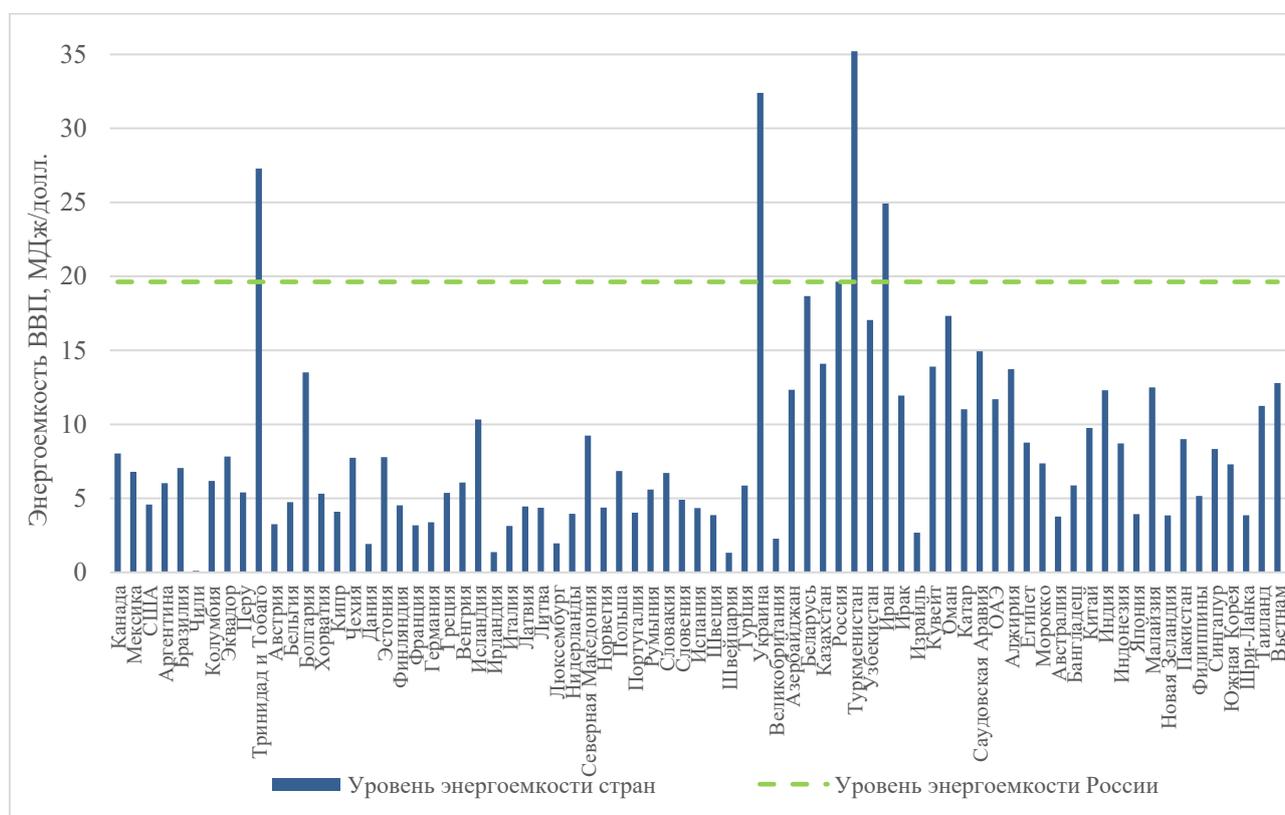


Рис. 1. Сопоставление энергоемкости России с уровнем других стран, МДж/долл.

Источник: рассчитано по данным ВР

Для повышения энергетической эффективности в стране необходимо повысить эффективность в ее составляющих – регионах. Регионы Восточной Сибири и Дальнего Востока отстают от других территорий по ряду показателей, при этом обладают общими особенностями, что позволяет сделать предположение о целесообразности их совместного рассмотрения. Таким образом, данное исследование посвящено исследованию энергетической эффективности отраслей экономики Дальнего Востока и Восточной Сибири.

Непосредственным анализом энергоёмкости (показателя, обратного энергоэффективности, а значит, очень с ним связанного) занимались такие авторы, как Т. Ю. Анисимова, Е. В. Наливайченко, С. В. Тишкова, А. Р. Рева, S. Farhani, S. A. Solarin, D. Streimikiene, R. Kasperowicz. Методические аспекты изучали Я. Н. Акулова, Л. В. Чайка, И. А. Башмаков, В. И. Башмаков, Z. Lingjuan, R. Jianqiang. Особенности топливно-энергетического комплекса регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока изучали в своих работах Л. В. Эдер, И. В. Филимонова, С. А. Моисеев, Е. А. Кашина, А. Я. Дякун, Т. М. Мамахатов, М. В. Мишенин, И. В. Проворная, А. А. Карташевич, А. В. Комарова. Новизна данного исследования заключается в объединении этих тем, фокусировании на вопросах оценки энергоэффективности в регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Целью данного исследования является оценка энергетической эффективности отраслей экономики Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Для достижения цели был поставлен ряд задач:

5. Изучить теоретические основы понятия «энергоэффективность» и способы ее оценки;
6. Выявить особенности регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока для обоснования их совместного рассмотрения;
7. Получить количественную оценку энергоёмкости секторов экономики регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока;
8. Формирование выводов по полученным результатам.

### *Методы и материалы*

В качестве объекта исследования было выбрано потребление электроэнергии в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Интерес к их изучению вызван рядом особенностей:

1. Территории Восточной Сибири и Дальнего Востока расположены на одной платформе – Сибирской, ограниченной рекой Енисей на западе и рекой Лена – на Востоке [1], что подчеркивает их географическую близость;
2. Обособленность энергетической системы Дальнего Востока и слабая разветвленность энергетической системы Сибири вызывает ряд особенностей энергопотребления;
3. Транспортная инфраструктура в регионах менее развита по сравнению с общим уровнем России. Например, на Дальнем Востоке и в Восточной Сибири плотность железных и автомобильных дорог сильно ниже по сравнению с российским уровнем (табл. 1).

*Таблица 1*

Плотность железных и автомобильных дорог в Восточной Сибири  
и на Дальнем Востоке, км/10 тыс. км<sup>2</sup>

Показатель	Восточная Сибирь	Дальний Восток	Россия
Средняя плотность ж/д путей, км/10 тыс. км <sup>2</sup>	16	18	51
Плотность автомобильных дорог, км/10 тыс. км <sup>2</sup>	19	12	65

*Источник: рассчитано по данным Росстата*

4. В регионах действуют общие нефте- и газопроводы («Восточная Сибирь – Тихий океан», «Сила Сибири»).

Таким образом, регионы целесообразно рассматривать вместе.

Для оценки энергоэффективности отраслей экономики регионов был использован показатель, обратный энергоэффективности – энергоемкость секторов, вычисляемый по формуле:

$$\mathcal{E}_i = \frac{V_i^3}{\text{ВРП}_i}$$

где  $\mathcal{E}_i$  – энергоемкость  $i$ -й отрасли экономики;  $V_i^3$  – объем потребленной энерго-ресурсов в  $i$ -й отрасли экономики;  $\text{ВРП}_i$  – валовой региональный продукт в  $i$ -й отрасли экономики.

Показатель энергоемкости входит в «систему показателей Росстата для статистической оценки уровня технологического развития отраслей экономики», авторы часто используют его для оценки эффективности использования энергии [2,3,4]. Существуют исследователи, сомневающиеся в корректности использования этого показателя [5], однако этот показатель прост для расчетов и интерпретации и позволяет получить представление об общем уровне энергетической эффективности. Поэтому в данном исследовании мы используем показатель энергоемкости.

В связи с отсутствием данных по потреблению тепловой энергии по регионам по отраслям экономики, были использованы данные только по потреблению электрической энергии. Таким образом, в данном случае под понятием «энергоемкость» далее будем иметь ввиду «электроемкость».

Для расчетов были использованы следующие данные:

1. Годовой объем ВРП по отраслям экономики в регионах в 2021 гг., руб.;
2. Годовое потребление электроэнергии по направлениям использования в регионах в 2021 гг., млн кВт·час.

Источником данных послужил Росстат. С целью упрощения расчетов данные по отраслям были сгруппированы в шесть укрупненных секторов экономики: промышленность, сельское хозяйство, строительство, торговля, транспорт и другие виды деятельности.

### ***Результаты и обсуждение***

Был проведен расчет значений энергоемкости каждого из шести секторов экономики для регионов (табл.2). Можем увидеть, что наиболее энергоемкими секторами экономики оказались сектор промышленности и сектор других видов деятельности. У примерно половины регионов наблюдаются относительно высокие показатели энергоемкости транспорта, что связано с высокой значимостью этого сектора в регионах. Так, например, для Красноярского края, Республики Хакасия, Иркутской области, Республики Бурятия, Забайкальского края, Приморского края, Хабаровского края, Амурской области, Еврейской автономной области одними из крупнейших потребителей электроэнергии являются фили-

алы ОАО «РЖД». Таким образом, мы выделили три наиболее энергоемких сектора, на повышение энергоэффективности в которых нужно обратить пристальное внимание. Наиболее энергоемким сектором промышленности обладает Республика Хакасия, транспортным сектором – Еврейская автономная область, а самая высокая энергоемкость сектора других видов деятельности в Иркутской области. Мы также приводим расчеты для России в целом в целях сравнения. Можно заметить, что во многих регионах наблюдается превышение общероссийского уровня, что является сигналом о низкой эффективности использования энергии.

Таблица 2

Энергоемкость секторов экономики регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока в 2021 г., кВт·час/тыс. руб.

Регионы	Энергоемкость сектора					
	Промыш-ть	С/х	Строительство	Торговля	Транспорт	Другие
РФ	23,7	5,5	2,6	2,4	10,8	14,0
Р. Тыва	22,9	2,8	7,4	17,1	15,5	15,2
Р. Хакасия	140,8	5,8	2,9	3,8	20,0	25,6
Красн. край	44,1	8,5	5,5	6,3	25,2	18,5
Ирк.область	77,7	12,7	2,2	8,2	27,4	44,8
Р. Бурятия	26,9	5,6	2,1	10,1	40,2	20,4
Р. Саха (Якутия)	9,1	2,5	0,6	2,9	31,7	14,3
Заб. край	23,9	1,3	3,5	1,4	37,7	34,3
Камч. край	15,1	0,7	2,4	6,1	3,8	11,9
Прим. край	34,3	1,2	3,0	4,7	9,3	20,2
Хаб. край	26,2	3,8	10,5	4,6	2,9	15,8
Амур. область	29,6	6,2	3,5	5,8	70,3	25,8
Маг.область	17,2	1,2	3,4	1,7	2,7	18,5
Сах. область	5,8	5,5	2,0	2,4	1,8	11,9
Еврейская АО	53,6	3,8	4,7	14,1	19,0	23,8
Чукотский АО	14,2	1,2	0,5	0,8	3,4	9,4

*Источник: рассчитано автором по данным Росстата*

Мы также выделили и три наименее энергоемких сектора – сельское хозяйство, строительство, торговля. Значения в этих секторах относительно невысоки, что позволяет уделять им меньше внимания в области повышения энергоэффективности, если есть проблемы с энергоемкими секторами.

### Заключение

В ходе исследования были рассчитаны значения энергоемкостей по секторам экономики для регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока, что позволило оценить уровень их энергетической эффективности. В результате выявились три наиболее энергоемких сектора экономики – сектор промышленности, сектор транспорта и сектор других видов деятельности, на которые необходимо обращать больше всего внимания при определении мер повышения энергоэффективности в регионе. Полученные результаты будут полезны при корректировании программ энергетического развития в регионах Восточной Сибири и Даль-

него Востока и определении объемов финансирования в целях повышения энергетической эффективности.

### *Благодарности*

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-78-10156, <https://rscf.ru/project/23-78-10156/>.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цейслер В. М. СИБИРСКАЯ ПЛАТФОРМА //Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2017). – 2017. – URL: <https://old.bigenc.ru/geology/text/3660286> (дата обращения: 18.02.2024).
2. Белова Т. Д. Методика оценки энергоэффективности региональной экономики //Региональная экономика: теория и практика. – 2016. – №. 3 (426). – С. 82-91.
3. Акулова Я. Н. Система показателей оценки энергоэффективности как фактора экономического роста региональной экономики //Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – №. 4 (165). – С. 33-38.
4. Наливайченко Е. В., Тишков С. В. Анализ энергоэффективности экономики Арктической зоны России в контексте достижения целей устойчивого развития //Инновационная парадигма экономических механизмов хозяйствования. – 2021. – С. 204-209.
5. Белов В. И. Повышение энергоэффективности регионов РФ: методика и апробация //Экономика и управление: проблемы и решения. – 2023. – Т. 5. – № 10. – С. 79–86.

© А. П. Саматова, А. В. Филимонов, 2024

*Е. А. Старыгина<sup>1\*</sup>, В. Д. Кожевин<sup>1</sup>, Е.А. Кузнецова<sup>1</sup>*

## **Формы протекционизма и либерализации мировой торговли услугами**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\*e-mail: elizabeth0803@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлен процесс развития протекционизма и либерализма на основе различных научных теорий, таких как меркантилизм, теория абсолютных преимуществ и теория Хекшера – Олина. Особое внимание уделяется анализу и взаимосвязи между этими теоретическими подходами и реальными практиками торговли услугами на международном уровне. Представлены ключевые концепции каждой из теорий и их влияние на формирование торговой политики различных стран и международных организаций. Также осуществлён обзор некоторых существующих международных соглашений в рамках ВТО, регулирующих торговлю услугами, и их роль в содействии либерализации. Проанализированы механизмы действия этих соглашений, их вклад в развитие международной торговли услугами. В работе рассматриваются как положительные, так и отрицательные аспекты международных соглашений, а также предлагаются рекомендации по их дальнейшему развитию и улучшению в целях более эффективного управления международной торговлей услугами и содействия экономическому росту и развитию.

**Ключевые слова:** протекционизм, либерализм, ВТО, мировая торговля услугами

*Е. А. Starygina<sup>1\*</sup>, V. D. Kozhevin<sup>1</sup>, E.A. Kuznetsova<sup>1</sup>*

## **Forms of protectionism and liberalization of world trade in services**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation  
\*e-mail: elizabeth0803@mail.ru

**Abstract.** The paper presents the process of development of protectionism and liberalism based on various scientific theories such as mercantilism, the theory of absolute advantages and the theory of Heckscher–Ohlin. Special attention is paid to the analysis and the relationship between these theoretical approaches and the actual practices of trade in services at the international level. The key concepts of each theory and their impact on the formation of trade policy of various countries and international organizations are presented. A review of some existing international agreements within the WTO governing trade in services and their role in promoting liberalization has also been carried out. The mechanisms of operation of these agreements, their contribution to the development of international trade in services and the challenges and problems caused by them are analyzed. The paper examines both positive and negative aspects of international agreements, as well as offers recommendations for their further development and improvement in order to better manage international trade in services and promote economic growth and development.

**Keywords:** protectionism, liberalism, WTO, global trade in services

## ***Введение***

Множество исследователей, экономистов, ученых и аналитиков занимались изучением протекционизма и либерализации торговли. Эта область привлекает внимание различных профессионалов, работающих в области международной экономики, международной торговли, макроэкономики, политической экономии и других связанных дисциплин.

Мировая торговля является одним из ключевых факторов, определяющих экономическое развитие и благосостояние стран. Она обеспечивает перемещение товаров и услуг между странами, способствует распределению ресурсов, стимулирует экономический рост и развитие, а также укрепляет международные экономические отношения и способствует специализации производства, позволяя каждой стране концентрироваться на производстве тех товаров и услуг, в которых она имеет компаративное преимущество.

В процессе становления и развития международных торговых отношений, сформировались две основные и совершенно противоположные модели внешне-торговой политики – протекционизм и свободная торговля (либерализм). Основной целью протекционизма является защита «своего производителя» от избыточной внешней конкуренции, повышение конкурентоспособности отечественной продукции на иностранных рынках и обеспечение роста товарооборота в интересах национальной экономики. В свою очередь фритредерство (либерализация) основывается на ликвидации торговых барьеров. Стоит отметить, что в современной мировой практике редко встречаются чистые формы этих подходов. Вместо этого большинство стран использует смешанную модель, комбинируя элементы обеих стратегий в зависимости от конкретных экономических задач, мировой ситуации и особенностей своего национального хозяйства.

### ***Развитие идей протекционизма и либерализация торговли***

Меркантилизм, впервые сформировавшийся в Англии в XVI-XVIII веках, выдвигал идею, что важно сохранять денежные средства внутри страны, для чего предлагалось вводить высокие таможенные пошлины, стимулировать экспорт и ограничивать импорт. С течением времени Адам Смит предложил концепцию свободной торговли, противопоставив ее протекционистским идеям меркантилизма. Он сформулировал теорию абсолютных преимуществ, выделяя выгоду международной торговли для стран с наиболее эффективным производством определенных товаров.

В XIX веке Британская империя, ставшая лидером мировой экономики, пересмотрела свою протекционистскую политику в пользу пропаганды и практики свободной торговли. Но возникли идеи, противоположные этой политике, например, от Фридриха Листа, основателя немецкой исторической школы, который считал, что свободная торговля может быть эффективной только при условии схожести уровня развития стран.

В начале XX века факторная теория Хекшера – Олина укрепила представления о международном разделении труда подняв волну либерализма, но Первая

мировая война и Великая депрессия привели к росту протекционизма в мировой торговле. Однако после Второй мировой войны международная торговля стала либерализоваться, в чем ключевую роль сыграли США с подписанием ГАТТ в 1947 году. Это соглашение стало отправной точкой для коллективной либерализации мировой торговли.

### *Развитие международной торговли услугами*

С 80-х годов XX века активизировался международный обмен услугами, что стимулировало стремление к созданию многосторонних соглашений. Уругвайский раунд переговоров (1986–1994 гг.) привел к подписанию соглашений по 56 мерам регулирования международной торговли, включая создание Всемирной торговой организации (ВТО). Главным документом стало Генеральное соглашение по торговле услугами (ГАТС), направленное на развитие и либерализацию торговли услугами.

Общая цель ВТО - помочь своим членам использовать торговлю как средство повышения уровня жизни, создания рабочих мест и улучшения жизни людей. ВТО управляет глобальной системой правил торговли и помогает развивающимся странам наращивать свой торговый потенциал. С 29 июля 2016 ВТО включает 164 стран-участников, а также 25 стран-наблюдателей.

В ГАТС прописаны как общие обязательства членов ВТО, так и специфические, которые предусмотрены для отдельных стран. Одним из важных общих обязательств, является режим наибольшего благоприятствования (РНБ), который гласит о следующем: «В отношении любой меры, охватываемой ГАТС, услугам и поставщикам услуг предоставляется режим, не менее благоприятный, чем тот, который он предоставляет для аналогичных услуг или поставщиков услуг любой другой страны». Следующее важное обязательство – транспарентность: «Обязательство публиковать или доводить до сведения иным образом, самое позднее с даты вступления в силу, меры общего применения. Обязательство информировать Совет по торговле услугами о принятии новых или внесении изменений в действующие нормативно-правовые акты, затрагивающие специфические обязательства, то есть те сектора услуг, в которых гарантируется определенный уровень доступа иностранных услуг и поставщиков услуг».

ГАТС признает, что не все страны смогут сразу выполнить обязательства по режиму наибольшего благоприятствования (РНБ), поэтому предоставляет право сохранять нарушающие его меры в определенных секторах услуг для поставщиков из других стран-членов ВТО. Исключения из РНБ могут сохраняться до 10 лет, после чего они должны быть отменены или стать предметом дальнейших переговоров о либерализации.

### *Заключение*

Несмотря на то, что ВТО в рамках ГАТС старается либерализовать торговлю услугами, существуют как позитивные, так и негативные аспекты подобного явления. К позитивным относится стимулирование экономического роста,

развитие конкуренции, создание равных условий труда, стимулирование инноваций. А к негативным - риски потери суверенитета, неоднородные выгоды: некоторые страны могут получить больше выгод от открытости рынков, чем другие, что может увеличить разрыв между бедными и богатыми странами. Полностью либерализовать торговлю услугами не получится, можно к этому стремиться, но это стремление присуще в основном только развитым странам, так как развивающиеся страны нуждаются в эффективном развитии собственного производства и поэтому склонны поддерживать политику протекционизма.

### *Благодарности*

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-78-10157, <https://rscf.ru/project/23-78-10157/>.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондарев А. В., Цаплин В. О. Теоретические и исторические аспекты развития протекционизма //XVII международная конференция " Российские регионы в фокусе перемен": сборник докладов. —Екатеринбург, 2022. – ООО Издательский Дом «Ажур», 2023. – С. 850-855.
2. Оболенский В. П. Либерализация и протекционизм в международной торговле //Российский внешнеэкономический вестник. – 2013. – №. 3. – С. 3-18.
3. Бабин Э. П., Исаченко Т. М. Внешнеэкономическая политика. М.: Экономика, 2007. С. 37.
4. Francois J. F., Wooton I. Trade in international transport services: the role of competition //Review of International Economics. – 2001. – vol. 9. – no. 2. – P. 249-261.
5. Сайт ВТО. URL: <http://www.rgwto.com/wto.asp> (дата обращения: 12.01.2024).

© Е. А. Старыгина, В. Д. Кожевин, Е. А. Кузнецова, 2024

*Т. О. Тагаева<sup>1</sup>, Л. К. Казанцева<sup>1\*</sup>, И. С. Татаринов<sup>2</sup>*

## **Экологические последствия добычи и переработки сырьевых ресурсов в Сибирском ФО**

<sup>1</sup> Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: klk@ieie.nsc.ru

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

**Аннотация.** В докладе анализируются географические особенности и ресурсный потенциал Сибирского федерального округа, регионы которого по запасам и разнообразию полезных ископаемых занимает одно из ведущих мест в Российской Федерации. Природные богатства составляют основу конкурентных преимуществ округа и определяют преобладание добывающих и перерабатывающих отраслей, что влечет за собой высокий уровень антропогенного воздействия на природную среду. Это определяет актуальность исследования. Представлен анализ негативного воздействия добычи и переработки сырьевых ресурсов на загрязнение атмосферного воздуха и водных ресурсов, а также на образование отходов и их обращение. Методом исследования является институциональный анализ опубликованных данных об объекте и предмете исследования. Объектом исследования является экономическая деятельность в Сибирском ФО с учетом экологической ситуации, предметом – направления и характер негативного влияния добычи и переработки на окружающую природную среду. Для анализа использованы статистические данные Росстата, государственных докладов и Росприроднадзора.

**Ключевые слова:** сырьевые ресурсы, добыча и переработка, негативное воздействие на компоненты природной среды

*Т. О. Тагаева<sup>1</sup>, L.K. Kazantseva<sup>1\*</sup>, I.S. Tatarinov<sup>2</sup>*

## **Ecological Consequences of Extraction and Processing of Resources in the Siberian FD**

<sup>1</sup>Institute of Economics and Industrial Engineering of Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia  
\* e-mail: klk@ieie.nsc.ru

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** The report analyzes the geographical features and resource potential of the Siberian Federal District, whose regions are among the leading in the Russian Federation in terms of reserves and diversity of minerals. Natural resources form the basis of competitive advantages of the district and determine the predominance of extractive and processing industries, which entails a high level of anthropogenic impact on the natural environment. This determines the relevance of the study. The analysis of the negative influence of raw materials extraction and processing on air and water pollution, as well as on waste generation is presented. The research method is institutional analysis of published data about the object and subject of the study. The object of the study is economic activity in the Siberian Federal District taking into account the environmental situation, the subject is the directions and nature of the mining and processing negative influence on the natural environment. Statistical data of Rosstat and Rosprirodnadzor, state reports were used for the analysis.

**Keywords:** raw material resources, extraction and processing, negative impact on the components of the natural environment

Сибирский федеральный округ – второй по величине регион Российской Федерации, площадь которого составляет 4 361,7 тыс. кв. километров (это более 25% площади страны). Он располагается в географическом центре страны и охватывает территории от вод Карского моря и моря Лаптевых до границ с Монголией, Республикой Казахстан и Китайской Народной Республикой. Включает в себя Северо-Сибирскую низменность, Среднесибирское плоскогорье, Южно-Сибирские горы и часть Западно-Сибирской равнины. Подобное расположение наряду с другими физико-географическими особенностями региона определили его огромный природно-ресурсный потенциал, представленный обширной минерально-сырьевой базой, лесным и водным фондами [1]:

- разведанные запасы угля составляют 77,6% от общероссийских;
- месторождения черных, цветных и драгоценных металлов (марганец – 62,9%, медь – 39,9%, свинец – 38,1%, молибден – 21,35%, золото – 35,5%, платиноиды – 96,93%, уран – 20,23%);
- углеводородное сырьё (нефть – 8,19% извлекаемых запасов по стране, свободный газ - 6,47%, растворённый газ – 12,29%);
- лесной фонд составляет более 25% от государственного;
- наличие крупных рек, позволяющих сооружать гидроэлектростанции мощностью до 6400 МВт.

Природное богатство выступает одним из основных конкурентных преимуществ округа и является фундаментом его экономического развития. Наибольшее внимание уделяется добывающим и перерабатывающим производствам, обслуживающим потребности в первичном сырье как на региональном, так и на федеральном уровнях. Преобладающими отраслями являются металлургия, нефтегазовая и угледобывающая промышленность, химические и деревообрабатывающие производства, гидроэнергетика. Не менее важным фактором роста региональной экономики выступает её связующая роль между Дальневосточным федеральным округом и промышленными комплексами Урала.

Цели и задачи исследования заключаются в характеристике последствий для экологии добычи и переработки сырьевых ресурсов в Сибирском ФО, основных показателей воздействия на окружающую среду, динамики образования и обращения отходов производства.

### ***Методы и материалы***

Основным методом исследования, результаты которого изложены в статье, является институциональный анализ, заключающийся в сборе и обработке опубликованных данных об объекте и предмете исследования.

Объектом исследования является экономическая деятельность по добыче и переработке сырьевых ресурсов на территории Сибирского ФО с учетом экологической ситуации, предметом – направления и характер негативного влияния добычи и переработки на окружающую природную среду, а именно на загрязне-

ние атмосферного воздуха и водных ресурсов, а также анализ динамики накопленных отходов производства и потребления.

Для анализа были использованы: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 26.01.2023 г. № 129-р. [2], статистические данные Росстата, информация Государственных докладов «Регионы России. Социально-экономические показатели. 2023» [3], «Социально-экономическое положение Сибирского федерального округа в I квартале 2022 года» [4], «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году» [5], «Наше общее будущее: доклад международной комиссии по окружающей среде и развитию (МКОСР)» [6].

### **Результаты**

В 2021 году валовый региональный продукт (ВРП) Сибирского федерального округа составил 11 286 млрд рублей (9,4% от суммарного ВВП страны). Структура ВРП по видам экономической деятельности представлена на рис. 1. Суммарная доля продукта, приходящаяся на добычу полезных ископаемых и обрабатывающие производства, составила 41,3%. Расширение данных секторов региональной экономики оказывает положительное влияние на поддержание внутренних производственных процессов страны и открывает большие возможности в сфере международной торговли за счёт экспорта энергоносителей.

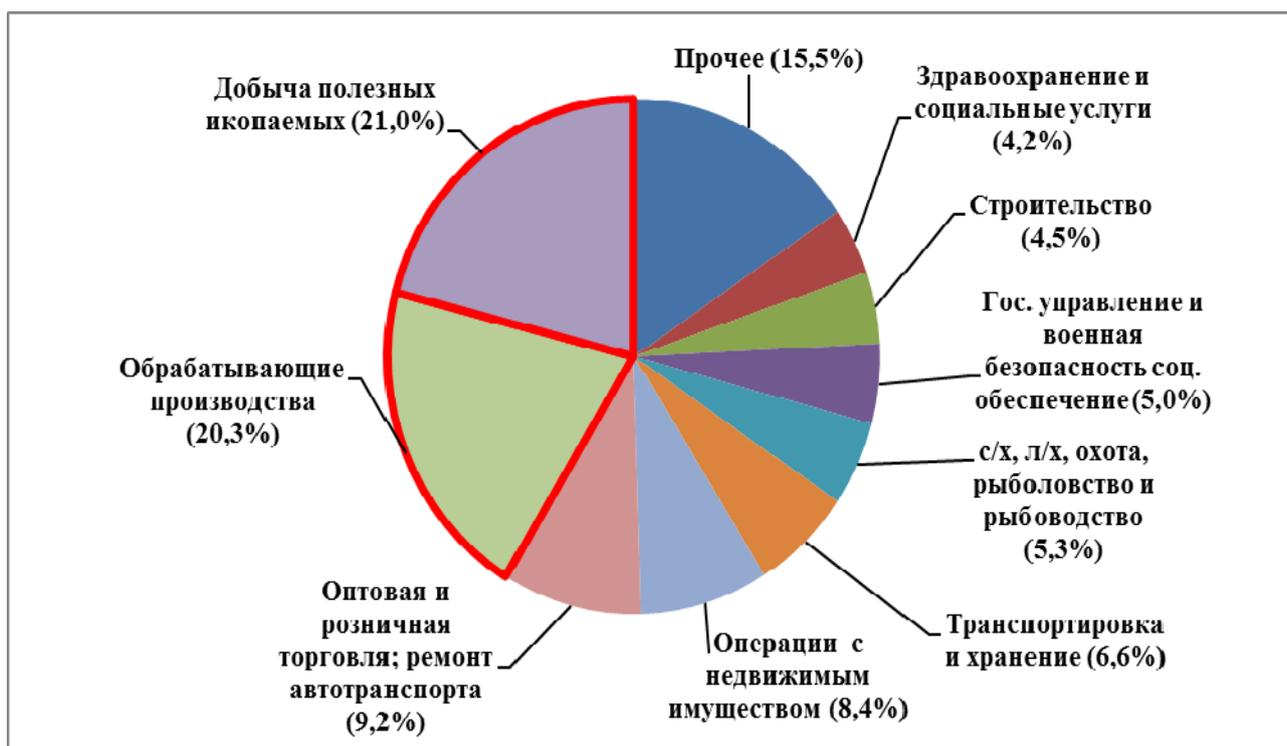


Рис. 1. Отраслевая структура ВРП СФО в 2021 году.  
Источник: составлено авторами на основе материалов [3]

Добыча полезных ископаемых (ДПИ) оказывает непосредственное воздействие на все компоненты среды: недра, почвы, поверхностные и подземные воды,

атмосферный воздух, растительный, животный мир, а также озоновый слой атмосферы. Неравномерное историческое освоение округа и выборочное размещение на территории округа крупных промышленных комплексов привели к существованию в нём районов, характеризующихся высокой техногенной нагрузкой, превышающей их ассимиляционный потенциал [7]. Это приводит к обострению экологической ситуации и ряду проблем, имеющих наиболее серьёзные последствия в субъектах с преимущественной деятельностью по добыче и проработке полезных ископаемых.

За 2022 год на территории Сибирского ФО было зарегистрировано 41 103 объектов негативного воздействия на окружающую среду, среди которых 5 509 относятся к категориям высокой и чрезвычайно высокой опасности. Преимущественными направлениями негативного влияния этих производственных объектов на окружающую природную среду является загрязнение атмосферного воздуха и водных ресурсов. Не менее важным является анализ динамики накопленных отходов производства и потребления.

Согласно докладу Минприроды РФ, валовой объём выбросов загрязняющих атмосферу веществ в Сибирском ФО в 2022 году составил 6 670,8 тыс. т (это более 30% от общероссийского показателя). На выбросы от стационарных источников пришлось 5 805,3 тыс. т (это около 34% от общероссийского объёма). Подобные сравнения закрепляют за Сибирским федеральным округом характеристику наиболее загрязнённого региона страны, количество выбросов в котором продолжает расти в соответствии с тенденциями расширения производства. Относительно предыдущего года прирост выбросов составил 5,35%. Лидерами по количеству загрязняющих веществ от стационарных источников стали Красноярский край – 15,33 % общероссийских выбросов, Кемеровская область (Кузбасс) – 9,28% и Иркутская область - 4,32%. Удельные выбросы на душу населения в Красноярском крае и Кемеровской области составили 995 кг и 645 кг, соответственно, при этом в целом по Сибирскому ФО – около 400 кг, а по России – около 200 кг.

### *Обсуждение*

Указанные масштабы выбросов являются закономерным следствием размещения на территории субъектов массивных промышленных комплексов добывающего характера. Процесс загрязнения атмосферы усугубляется многоэтапным производством продукции и её последующим потреблением на этой же территории как отдельными домохозяйствами, так и крупными предприятиями в ходе дальнейшей переработки сырья.

Важным фактором служат и климатические условия округа, приводящие к повышенным удельным показателям потребления энергоносителей на одного человека в связи с активным использованием угольных и газовых топливных ресурсов частным сектором, а также способствующие накоплению и росту концентрации выбрасываемых при сжигании веществ [8].

Таким образом, преобладающее число городов Сибирского округа существует и развивается в рамках существенного превышения допустимых объёмов

концентрации загрязняющих веществ в составе атмосферного воздуха: более 68% городского населения округа проживает в условиях высокого уровня загрязнений с ИЗА (комплексный индекс загрязнения атмосферы), превышающим 7%. Более того, текущая статистическая информация едва ли способна в полной мере отразить реальное состояние и динамику загрязнения атмосферного воздуха вследствие регулярных нормативных повышений ПДК при учёте тех или иных загрязняющих веществ, искажающих оценочные показатели [9].

В структуре водопользования СФО основным направлением выступает забор воды на производственные нужды, составивший в 2022 году 4 490,41 млн м<sup>3</sup> (это почти 77,5% от общей структуры использования). Проблемой выступает малоэффективный процесс водоотведения, приводящий к загрязнению поверхностных водных источников посредством сброса сточных вод, недостаточно очищенных или вовсе без очистки. Этот показатель в 2022 году, по данным Росводресурсов, установился на отметке 1 361,92 млн м<sup>3</sup> в сумме по СФО (это 12% от общего объема сброса загрязнённых вод по стране) и 82 м<sup>3</sup> на душу населения, что превышает средний показатель по РФ – 77 м<sup>3</sup>.

Наибольший объём сброса загрязнённых сточных вод приходится на Иркутскую область – 3,95%. Несмотря на тенденцию снижения объёмов сброса как в бассейны крупнейших рек округа – Енисея и Оби (снижение на 0,1 и 0,8 млрд м<sup>3</sup> за период с 2015 по 2022 гг. по данным Росводресурсов), так и более мелкие поверхностные и подземные источники (уменьшение на 3,3% по сравнению с 2021 г.), сохранение качества вод Сибирского федерального округа нуждается в усовершенствовании процессов очистки и установке на производствах современных водоочистных сооружений.

В силу добывающей и перерабатывающей сырьё ориентации, в промышленности СФО преобладают более сложные по своему составу сточные воды, содержащие большой спектр загрязняющих веществ в зависимости от используемого сырья. А именно: углеводородные соединения и фенолы, поступающие с нефтехимических заводов и в ходе производства строительных материалов; нерастворимые взвешенные примеси неорганического происхождения строительных и камнеобрабатывающих заводов; органические волокнистые отходы в целлюлозно-бумажной промышленности; ионы тяжёлых металлов, кислоты, серные соединения, реагенты при добыче полезных ископаемых и обогащении руды. Сточные воды подобного характера требуют механических и физико-химических методов очистки, а также термических и биотермических способов утилизации обезвоженных осадков [10]. Однако большинство предприятий округа ограничены в возможности оперативного введения инновационных способов очистки сточных вод из-за недостатка финансовой обеспеченности, как в случае частных компаний, так и в случае спонсируемых непосредственно региональными бюджетами.

Большие опасения вызывает динамика накопления на территории субъектов Сибирского федерального округа производственных и потребительских отходов. На протяжении всего своего развития, как крупнейшей энергетической и сырьевой базы страны, производственные отходы располагаемых на его территории

промышленных комплексов не были предметом особого внимания, что при высоких темпах экономического развития привело к скоплению огромных объёмов химических органических и минеральных, твёрдых коммунальных расходов.

На данный момент проблема размещения, утилизации и обезвреживания отходов является ключевым направлением стратегии поддержания экологической безопасности Сибирского федерального округа. По данным Росприроднадзора, в 2021 году количество образованных отходов на территории округа составило 5 352,2 млн т (это 63,4% от всего объёма по Российской Федерации), среди которого более 70% приходится на Кемеровскую область. Далее по степени вклада в общий объём образованных отходов идут Красноярский край (10,4%), Республика Хакасия (7,9%) и Иркутская область (6,96%).

В структуре Сибирского федерального округа производственные отходы добывающей отрасли закономерно выступают преобладающим видом, составляя около 90%. Огромная часть отходов генерируется в угольной промышленности на всех этапах угледобычи, обработки и газификации. Это пылегазовые отходы вскрышной и шахтной породы при открытом и закрытом методах добычи, отходы гравитационного и флотационного обогащения угля, зольные и шлаковые отходы переработки [11]. Хранение угольных отходов и других подобных вторичных продуктов с длительными сроками разложения, возникающих в ходе добычи полезных ископаемых, связано с риском загрязнения выделяемыми токсичными веществами окружающей природной среды. Их хранение вызывает отчуждение и деградацию земель, а проникновение в почву засоряет подземные и поверхностные воды, препятствует естественным процессам и стабильному функционированию экосистемы. Нахождение территорий складирования отходов вблизи населённых пунктов оказывает влияние и на жителей Сибирского федерального округа, на каждого из которых в среднем по СФО приходится более 335 т ежегодного прироста отходов.

### ***Заключение***

Рассмотренная статистика в целом подтверждает существование в Сибирском федеральном округе серьёзных экологических проблем и явного дисбаланса экономического развития с точки зрения его устойчивости. Текущие темпы наращивания производственных мощностей по добыче и переработке сырьевых ресурсов ещё больше усугубляют сформировавшуюся ситуацию. Ухудшение экологической ситуации по совокупности рассмотренных направлений приводит к неизбежному снижению качества жизни и создаёт многочисленные факторы, угрожающие здоровью населения СФО.

### ***Благодарности***

Доклад подготовлен в рамках НИР ИЭОПП СО РАН, проект 5.6.6.4. (0260-2021-0008) "Методы и модели обоснования стратегии развития экономики России в условиях меняющейся макроэкономической реальности".

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ерохина Е. В. Анализ развития регионов Сибирского федерального округа: оценка и стратегические перспективы // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2016. – № 11-3. – С. 752–760.
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 26.01.2023 г. № 129-р. // URL: <http://government.ru/docs/all/145780/> (дата обращения: 08.03.2024)
3. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2023: Статистический сборник / Росстат. – М., 2023. – 1128 с.
4. Социально-экономическое положение Сибирского федерального округа в I квартале 2022 года / Росстат. – М., 2022. – 73 с. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Sibirskij-fo\\_2k-2022.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Sibirskij-fo_2k-2022.pdf) (дата обращения 02.03.2024).
5. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году / Минприроды России. – М., 2023. – 686 с. URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/gosudarstvennyu\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_v\\_2022/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyu_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2022/) (дата обращения 12.03.2024).
6. Наше общее будущее: доклад международной комиссии по окружающей среде и развитию (МКОСР): пер. с англ. / Под ред. С. А. Евтеева, Р. А. Перелета. – М.: Прогресс, 1989. – 371 с.
7. Бурматова О. П. Регионы Сибири с напряжённой экологической ситуацией: причины и решения // Развитие территорий. – 2023. – № 4. – С. 28–39.
8. Ревич Б. А. Экологические приоритеты и здоровье: социально уязвимые территории и группы населения // Экология человека. – 2010. – № 7. – С. 3–9.
9. Гильмундинов В. М., Тагаева Т. О. Экологические аспекты новой волны сырьевой индустриализации азиатской России / Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. – 2021. – № 7. – С. 998–1007.
10. Чернов В. А. Проблемы экологии водных ресурсов и перспективы устойчивого развития / Научный журнал НИУ ИТМО. Экономика и экологический менеджмент. – 2020. – № 3. – С. 98–113.
11. Андреева Т. А. Отходы производства угольной промышленности // Сборник материалов X всероссийской, научно-практической конференции молодых учёных с международным участием «Россия молодая». Кемерово, 24–27 апр. 2018 г.: 601 с. – Кемерово КузГТУ, 2018. – С. 53301.1–53301.4.

© Т. О. Тагаева, Л. К. Казанцева, И. С. Татаринов, 2024

*Е. А. Шиян<sup>1\*</sup>, В. Ю. Немов<sup>1,2</sup>*

## **Экономические вопросы воспроизводства сырьевой базы углеводородов**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,

Российская Федерация

\*e-mail: e.shiyan@g.nsu.ru

**Аннотация.** Исследование посвящено вопросу окупаемости затрат на воспроизводство минерально-сырьевой базы в России. В статье проанализирована теоретическая и законодательная база о проведении геологоразведочных работ в РФ, а также статические данные о финансировании и объеме ГРП. На основе метрик расчета окупаемости, приводимых в зарубежной и отечественной литературе, выбран наиболее подходящий способ расчета в условиях российской экономики и проведены соответствующие вычисления. Исследование показало, что региональный этап геологоразведочных работ является перспективным направлением вложения средств для государства и полностью окупается в рассматриваемом периоде за счет разовых платежей со стороны недропользователей. Был сформулирован ряд рекомендаций по стратегии увеличения геологоразведочных работ: увеличивать долю затрат на ГРП государственном бюджете, выходить на новые территории, привлекать недропользователей к региональному этапу, участвовать в международных проектах.

**Ключевые слова:** геологоразведочные работы (ГРП), региональный этап, воспроизводство энергетических ресурсов

*E. A. Shiyan<sup>1\*</sup>, V. Yu. Nemov<sup>1,2</sup>*

## **Economic issues of reproduction of the raw hydrocarbon base**

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,

Novosibirsk, the Russian Federation

\*e-mail: e.shiyan@g.nsu.ru

**Abstract.** The study is devoted to the issue of cost recovery for the reproduction of the mineral resource base in Russia. The article analyzes the theoretical and legislative framework for conducting geological exploration in the Russian Federation, as well as static data on the financing and volume of exploration. Based on the payback calculation metrics given in foreign and domestic literature, the most appropriate calculation method was selected in the conditions of the Russian economy and the corresponding calculations were carried out. The study showed that the regional stage of exploration is a promising area of investment for the state and fully pays off in the period under review due to one-time payments from subsoil users. A number of recommendations were formulated on the strategy of increasing exploration: to increase the share of exploration costs in the state budget, to enter new territories, to attract subsoil users to the regional stage, to participate in international projects.

**Keywords:** geological exploration works (GEW), regional stage, reproduction of energy resources

## ***Введение***

Отраслевая структура экономики Российской Федерации достаточно диверсифицирована, однако, по-прежнему, к одной из базовых отраслей можно отнести добычу полезных ископаемых. Минерально-сырьевой комплекс обеспечивает функционирование металлургии, машиностроения, электроэнергетики, химической промышленности и других отраслей.

Рациональное использование ресурсов недр обеспечивает фундамент для стабильного долгосрочного развития отраслей производственной и непроизводственной сфер, способствует появлению значительных социально-экономических эффектов для общества.

Россия занимает лидирующие позиции в мире по запасам, добыче и экспорту части полезных ископаемых. Для поддержания устойчивого баланса восполнения и выбытия запасов необходимо непрерывное осуществление поисковых и геологоразведочных работ (ГРР), которые выступают фундаментом воспроизводства минерально-сырьевой базы. При этом на текущий момент объем реализации данных работ не обеспечивает в полной мере того уровня воспроизводства, которое бы соответствовало потребностям и перспективам развития российской экономики [2].

Особую роль в развитии ресурсной базы играет государство, которое осуществляет первый этап геологоразведочных и поисковых работ – региональный, без которого невозможно воспроизводство минерально-сырьевой базы.

На основе вышеперечисленных факторов возникает закономерный вопрос: если текущего объёма геологоразведочных работ недостаточно для воспроизводства минерально-сырьевой базы, значит ли это, что государству не выгодно в них вкладываться и затраты не окупаются, или ресурсный потенциал страны истощен и вложение средств не рационально?

### ***Теоретическая и законодательная база***

Правительство Российской Федерации признает вопрос воспроизводства минерально-сырьевой базы важным для развития экономики страны и выделяет его как одну из стратегических целей развития страны. В качестве основополагающих документов данного исследования выбраны: «Стратегия развития минерально-сырьевой базы до 2035 года», «Энергетическая стратегия Российской Федерации 2035 года», «Генеральная схема развития нефтяной отрасли до 2035 года» и «Генеральная схема развития газовой отрасли до 2035 года».

Стратегические документы определяют, что минерально-сырьевая база – это совокупность разведанных и оцененных запасов полезных ископаемых, а также локализованных и прогнозных ресурсов [4]. Её воспроизводство осуществляется за счет геологоразведочных работ, представляющих собой комплекс работ по обнаружению и подготовке к промышленному освоению месторождений, который состоит из трех этапов: региональный, поисково-оценочный и разведочный.

Согласно закону «О недрах», существует разделение источников финансирования этапов геологоразведочных работ. Региональное исследование финансируется государством, а непосредственно воспроизводство МСБ, включающее в себя поиск, оценку и разведку, осуществляют недропользователи [1]. Тогда в случае исследования эффективности первого этапа, мы получим, что бенефициаром выгод будет государство, для которого выгода будет состоять в объеме полученных им разовых платежей.

В данной работе приоритетно рассматривается региональный этап, финансируемый за счет средств федерального бюджета, так как авторы считают его некоторым пусковым механизмом в цепочке ГРР, определяющим величину воспроизводства минерально-сырьевой базы в целом. В качестве элемента минерально-сырьевой базы детально исследуются углеводороды, как интересующее авторов высоколиквидное сырье.

### **Оценка современного состояния воспроизводства минерально-сырьевой базы**

На рис. 1 и рис. 2. отражены данные о приросте запасов по нефти и газу за период 1991–2023 гг. Можно заметить, что расширение запасов и их «проедание» (ситуация, когда объём разведанных и подготовленных к промышленной эксплуатации запасов нефти не компенсировал уровень текущего их изъятия из недр) сменяются волнообразно. Данный характер изменений вызван высокой зависимостью от текущей экономической ситуации и политики в сфере воспроизводства минерально-сырьевой базы.

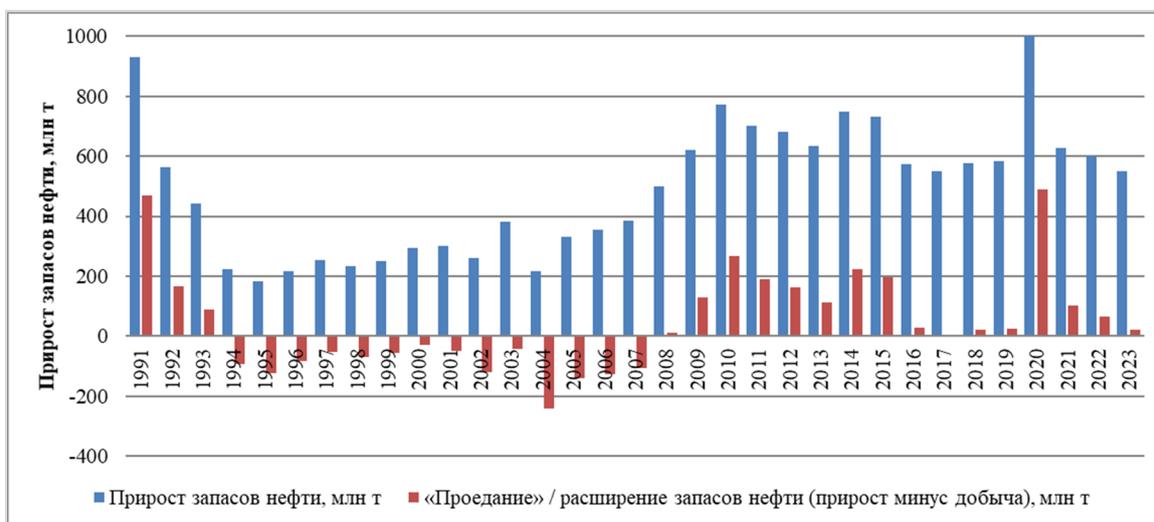


Рис. 1. Прирост запасов нефти в сравнении с их расширением за 1991 – 2023 гг.  
 Источник: составлено автором на основе [3]

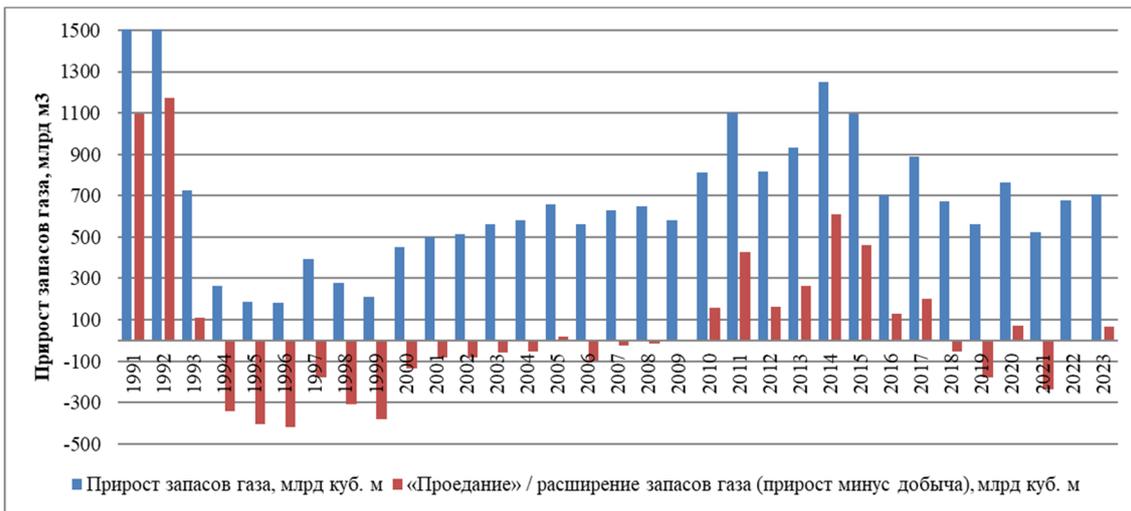


Рис. 2. Прирост запасов газа в сравнении с их расширением за 1991 – 2023 гг.  
 Источник: составлено автором на основе [3]

За последние 3 года прирост запасов по результатам ГРП находится в диапазоне от 550 до 614 млн тонн по нефти и от 529 до 705 млрд м<sup>3</sup> по газу. Ежегодно открываются новые месторождения, однако все больше среднего и мелкого размера. Основной прирост запасов осуществляется за счет месторождений, расположенных в Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах, республике Татарстан.

Таким образом, в России ведутся работы по поиску запасов. Однако, согласно прогнозам, еще неоткрытые ресурсы нефти и газа на территории России оцениваются соответственно в 90 млрд т и 216 трлн м<sup>3</sup>. Именно поэтому геологоразведочные работы являются важнейшим элементом процесса воспроизводства минерально-сырьевой базы страны, которая непосредственно влияет на позицию России на мировой арене.

### ***Расчет окупаемости затрат на воспроизводство энергетических ресурсов в России***

Для анализа выбран период 2014-2023 гг. Оценка окупаемости затрат на геологоразведочные работы на энергетические ресурсы в России мы будем определять через показатель эффективности геологоразведочных работ. При расчете эффективности на региональном этапе необходимо учитывать важную отраслевую особенность – данный этап финансируется государством, а затем окупается им за счет разовых платежей.

$$\text{Эффективность ГРП} = \frac{\text{Разовые платежи, поступившие в федеральный бюджет РФ, млрд руб.}}{\text{Объем ГРП за счет федерального бюджета РФ, млрд руб.}}, \quad (1)$$

Простыми словами, данная формула отражает отношение поступлений к затратам. Соотношение представленных величин позволит оценить вы-

годы/убытки государства от осуществления работ по геологоразведке территорий.

На рис. 3 отражены результаты, проведенных расчетов. За весь рассматриваемый период, исключая 2023 г., эффективность превышает значение 1, что означает, что поступления в бюджет превышали его затраты. Чем более высокий показатель эффективности, тем более заинтересованы были недропользователи в участках на аукционах в данный год.

Наглядно видно, что федеральный бюджет в большинстве случаев значительно выигрывает от проведения геологоразведочных работ, передавая участки недропользователям.

Эффективность ГРР за счет средств федерального бюджета сильно варьируется из года в год. Это зависит от особенностей отрасли: наличие переходящих работ, неопределенность в качестве и количестве открытых запасов, зависимость разовых платежей от заинтересованности недропользователей.



Рис. 3. Эффективность геологоразведочных работ за счет средств федерального бюджета. Источник: составлено на основе расчетов автора

Проведение государством регионального этапа геологоразведочных работ является выгодным вложением средств, что показали расчеты. Это доказывает необходимость увеличения вложений, способствующих в результате не только получению прибыли, но и воспроизводству минерально-сырьевой базы страны, увеличению запасов и повышению позиций страны на мировом рынке.

### *Заключение*

Результаты проведенного анализа показали, что проведение регионального этапа геологоразведочных работ является выгодным вложением средств для гос-

ударства. Инвестированные средства окупаются за счет разовых платежей, выплачиваемых недропользователями.

В ходе исследования был сформулирован ряд рекомендаций по стратегии увеличения геологоразведочных работ с учетом оценки окупаемости процесса воспроизводства энергетических ресурсов:

1. Увеличение доли затрат на геологоразведочные работы в федеральном бюджете, так как исследование определило, что это является хорошо окупаемым процессом.

2. Выход на новые территории, которые обеспечат прирост запасов.

3. Привлечение недропользователей к региональному этапу геологоразведочных работ и развитие взаимодействия с ними для увеличения их заинтересованности в аукционах.

4. Интеграция в новые международные проекты, что создаст новый стимул в развитии геологоразведочных работ в России.

Таким образом, обширная ресурсная база является одним из конкурентных преимуществ российской экономики. Инвестируя в геологоразведочные работы, государство способствует устойчивому долгосрочному развитию экономики.

### *Благодарности*

Исследование выполнено за счет проекта ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0013 по программе ФНИ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Закон РФ «О недрах» от 21.02.1992 №2395-1. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_343](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343) (дата обращения: 18.02.2024)

2. Иванова Л. В. Воспроизводство минерально-сырьевой базы РФ: текущие проблемы и перспективные формы реализации //Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – №. 5 (31). – С. 69-72.

3. Статистическая отчетность Роснедр. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/category/214.html?mm=246&ml=45> (дата обращения: 08.05.2024)

4. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. 2018 г. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_314605](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_314605) (дата обращения: 18.02.2024).

© Е. А. Шиян, В. Ю. Немов, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

1. И. В. Тищенко. Компоновка проходчика для сооружения скважин в грунтовом массиве .....	3
2. А. В. Азаров, С. В. Сердюков. Исследование траекторий трещин гидроразрыва пласта вблизи полости в условиях неоднородного сжатия.....	11
3. А. В. Азаров, С. В. Сердюков. Численное исследование закономерностей изменения давления распространения трещины гидроразрыва при её развитии вблизи полости .....	19
4. С. Е. Алексеев, Б. Кубанычбек. Пути повышения ресурса деталей погружного пневмоударника .....	26
5. Ю. В. Ванаг, И. В. Тищенко. Силовое тяговое устройство грунтопроходческого комплекса циклического действия.....	34
6. Е. Г. Куликова. Особенности самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей, закрепленных на основании малой изгибной жесткости.....	42
7. С. Я. Левенсон, М. А. Ланцевич, А. В. Морозов. Оценка возможности сооружения скважин большого диаметра инерционно-ударным рабочим органом .....	52
8. А. А. Леуткин, Б. Ф. Симонов, А. О. Кордубайло. Электронная система обнаружения крайних положений бойка электромагнитного молота .....	61
9. Н. А. Мирошниченко, А. В. Панов. Закономерности пространственно-временного распределения энергетических параметров техногенной сейсмичности при отработке Таштагольского железорудного месторождения .....	68
10. С. А. Павлов. Моделирование процесса пылераспределения в угольной лаве при использовании струйного вентилятора, установленного на очистном комбайне .....	77
11. С. А. Павлов. Технические решения для повышения безопасности на путях эвакуации метрополитена.....	86
12. А. А. Речкин. Оптимизация конструктивных параметров пневматической ударной машины со стационарно установленным упругим клапаном .....	97
13. Д. Е. Рублев. Влияние водно-эрозионных процессов на устойчивость борта угольного разреза .....	104
14. Е. П. Русин, Г. Н. Хан. К разработке средств моделирования внедрения активного ковша ПДМ в штабель горной массы .....	111
15. А. К. Салчак, В. И. Ростовцев. Особенности минерального состава полиметаллической руды и технология ее предварительного обогащения.....	119
16. И. М. Сердюк, С. В. Сердюков, К. А. Райко. Исследование акустической эмиссии при трехосном испытании дисперсных грунтов .....	127

17. А. А. Скулкин, Е. В. Рубцова. Лабораторные испытания герметизирующих элементов скважинного зонда для выполнения измерительного гидроразрыва.....	131
18. А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, Л. В. Городилов, О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко. К вопросу определения приложенных нагрузок к массиву пород, его структуры по данным измерений смещений на контуре цилиндрической выработки.....	138
19. А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова, О. А. Лукьяшко. О выборе вида сопротивления среды внедрению и об эффективности внедряемого инструмента.....	146
20. А. И. Чанышев, Л. В. Городилов, Д. В. Степанов. Определение теплового состояния породного массива от действия сосредоточенного подземного источника.....	155
21. В. В. Червов, А. В. Червов. Температура кольцевого упругого клапана камеры холостого хода пневмомолота.....	160
22. Е. Н. Шер. Расчет паспорта прочности хрупких пород в двухмерной постановке.....	167
23. Т. В. Шилова, А. Н. Дробчик. Исследование влияния полиуретановых составов на деформационно-прочностные свойства песков в условиях трехосного сжатия.....	174
24. А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, Д. О. Чещин, В. В. Плохих. Применение щелевой разгрузки для определения смещений контура выработки.....	181
25. А. О. Гордеева, Л. Н. Константинова, С. А. Моисеев, Е. В. Белова. Итоги лицензирования недр центральных и южных районов Красноярского края (Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция).....	189
26. Е. В. Гоосен, В. И. Клишин, С. М. Никитенко. Производственные цепочки в угольной отрасли: состояние и перспективы.....	197
27. Н. Г. Акопов, Е. А. Кузнецова. Особенности применения машинного обучения при прогнозировании потребления энергетических ресурсов.....	204
28. А. Д. Бессмертных, А. А. Карташевич. Возможности управления углеродным следом продукции в сфере охвата 3.....	208
29. М. А. Близневская, И. В. Проворная. Маршруты морских поставок российской нефти в страны АТР.....	214
30. Т. Т-Ж. Будариев, А. Ю. Новиков. Эмпирические показатели ресурсных факторов в моделях экономического роста.....	222
31. В. А. Вахнова, И. В. Проворная. Оценка развитости рынка газомоторного топлива в России.....	226
32. К. Д. Гладких, И. В. Проворная. Теоретико-методологические основы управления региональными социально-экономическими системами.....	235
33. А. О. Киселёв, А. Ю. Новиков. Основные факторы, используемые в гравитационных моделях для анализа мировых торговых потоков.....	241
34. А. В. Комарова, Т. Ким. Факторы устойчивого развития нефтегазовых компаний России.....	246

35. Д. С. Кубышев, А. В. Комарова. Влияние налогового бремени на экономический рост регионов России .....	252
36. Я. А. Мкртчян, Е. А. Кузнецова. Устойчивое развитие развивающихся стран в контексте продовольственной безопасности .....	257
37. В. Е. Морозова, И. В. Проворная. Применение метода главных компонент для исследования выполнения параметров государственных программ.....	262
38. Д. В. Подолякин, М. В. Мишенин. Современное состояние теплофикации в отдаленных регионах страны .....	268
39. К. С. Саблин, Е. В. Гоосен, О. К. Гоосен. Роль государства в цепочках создания стоимости в угольной отрасли .....	274
40. Н. В. Сальникова, И. В. Филимонова. Роль нефтегазовых компаний на фондовом рынке России .....	280
41. А. П. Саматова, А. В. Филимонов. Энергоэффективность отраслей экономики регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока .....	285
42. Е. А. Старыгина, В. Д. Кожевин, Е. А. Кузнецова. Формы протекционизма и либерализации мировой торговли услугами.....	291
43. Т. О. Тагаева, Л. К. Казанцева, И. С. Татаринов. Экологические последствия добычи и переработки сырьевых ресурсов в Сибирском ФО .....	295
44. Е. А. Шиян, В. Ю. Немов. Экономические вопросы воспроизводства сырьевой базы углеводородов .....	302

## CONTENTS

1. I. V. Tishchenko. Construction of the tunneling machine for boreholes in the soil mass .....	3
2. A. V. Azarov, S. V. Serdyukov. Study of trajectories of hydraulic fracturing cracks near a cavity under conditions of non-uniform compression.....	11
3. A. V. Azarov, S. V. Serdyukov. Numerical study of changes in the propagation pressure of a hydraulic fracturing crack during its growth near a cavity .....	19
4. S. E. Alekseev, B. Kubanychbek. Ways of extending life time of parts of down-the-hole air drill hammer.....	26
5. Yu.V. Vanag, I.V. Tishchenko. The traction equipment of a cyclic action tunneling machine .....	34
6. E. G. Kulikova. Features of self-synchronization of unbalanced vibration exciters mounted on the small bending stiffness base .....	42
7. S. Ya. Levenson, M. A. Lantsevich, A. V. Morozov. Assessment of the possibility of construction of large diameter boreholes by inertial-impact working tool.....	52
8. A. A. Leutkin, B. F. Simonov, A. O. Kurdubaylo. Electronic System for Detecting the Extreme Positions of the Electromagnetic Hammer Striker.....	61
9. N. A. Miroshnichenko, A. V. Panov. Regularities of spatio-temporal distribution of energy parameters of induced seismicity in mining Tashtagol iron ore deposit .....	68
10. S. A. Pavlov. Simulation of the dust distribution process in coal longwall using jet fan installed on a shearer .....	77
11. S. A. Pavlov. A method for reducing the concentration of methane in very long coal longwall using jet fan installed on a shearer .....	86
12. A. A. Rechkin. Optimization of Design Parameters of the Pneumatic Impact Machine with Stationary Installed Elastic Valve.....	97
13. D. E. Rublev. The influence of water erosion processes on the stability of the sides of a coal cut .....	104
14. E. P. Rusin, G. N. Khan. On the development of means for simulating the penetration of an active LHD bucket into a rock pile .....	111
15. A. K. Salchak, V. I. Rostovtsev. Features of the mineral composition of polymetallic ore and technology of its pre-enrichment.....	119
16. I. M. Serdyuk, S. V. Serdyukov, K. A. Rayko. Investigation of acoustic emission during triaxial testing of dispersed soils .....	127
17. A. A. Skulkin, E. V. Rubtsova. Laboratory testing of sealing elements of the borehole probe for measuring hydraulic fracturing.....	131

18. A. I. Chanyshv, I. M. Abdulin, L. V. Gorodilov, O. E. Belousova, O. A. Lukyashko. On the issue of determining applied loads to a rock mass and its structure based on displacement measurements on the contour of a cylindrical excavation.....	138
19. A. I. Chanyshv, O. E. Belousova, O.A. Lukyashko. About medium resistance to penetration and the effectiveness of the penetrating tool.....	146
20. A. I. Chanyshv, L. V. Gorodilov, D. V. Stepanov, and A. I. Pershin. Determination of the thermal state of the rock mass from the action of a concentrated underground source.....	155
21. V. V. Chervov, A. V. Chervov. The temperature of the annular elastic valve of the pneumatic hammer idling chamber .....	160
22. E. N. Sher. Calculation of the strength passport of brittle rocks in a two-dimensional formulation.....	167
23. T. V. Shilova, A. N. Drobchik. Study of influence of polyurethane compositions on deformation-strength properties of sand under triaxial compression.....	174
24. A. I. Chanyshv, I. M. Abdulin, D. O. Cheshchin, V. V. Plokhikh. Application of slot unloading to determine displacements of the excavation contour .....	181
25. A. O. Gordeeva, L. N. Konstantinova, S. A. Moiseev, E. V. Belova. The results of licensing the subsoil of the central and southern regions of the Krasnoyarsk region (Leno-Tunguska oil and gas province).....	189
26. E. V. Goosen, V. I. Klishin, S. M. Nikitenko. Production chains in the coal industry: status and prospects .....	197
27. N. G. Akopov, E. A. Kuznetsova. Features of the use of machine learning in forecasting energy consumption .....	204
28. A. D. Bessmertnykh, A. A. Kartashevich. The possibilities of managing the carbon footprint of products in the scope of 3 .....	208
29. M. A. Bliznevskaya, I. V. Provornaya. Routes for maritime supplies of Russian oil to Asia-Pacific countries .....	214
30. T. T-Zh. Budariev, A. Y. Novikov. Empirical indicators of resource factors in economic growth models .....	222
31. V. A. Vakhnova, I. V. Provornaya. Assessment of the development of the gas engine fuel market in Russia .....	226
32. K. D. Gladkikh, I. V. Provornaya. Theoretical and methodological foundations of the management of regional socio-economic systems.....	235
33. A. O. Kiselev, A. Y. Novikov. Main factors used in gravity models to analyze global trade flows.....	241
34. A. V. Komarova, T. Kim. Factors of sustainable development of oil and gas companies in Russia.....	246
35. D. S. Kubyshev, A. V. Komarova. The impact of the tax burden on the economic growth of Russian regions .....	252
36. Y. A. Mkrtchyan, E. A. Kuznetsova. Sustainable Development of Developing Countries in the Context of Food Security .....	257

37. V. E. Morozova, I. V. Provornaya. Application of the principal component analysis for the study of the implementation of the parameters of government programs.....	262
38. D. V. Podolyakin, M. B. Мишенин. The current state of heating in remote regions of the country.....	268
39. K. S. Sablin, E. V. Goosen, O. K. Goosen. The role of the state in value chains in the coal industry .....	274
40. N. V. Salnikova, I. V. Filimonova. The role of oil and gas companies in the Russian stock market.....	280
41. A. P. Samatova, A. V. Filimonov. Energy efficiency of economic sectors in the regions of Eastern Siberia and the Far East .....	285
42. E. A. Starygina, V. D. Kozhevnikov, E. A. Kuznetsova. Forms of protectionism and liberalization of world trade in services .....	291
43. T. O. Tagaeva, L. K. Kazantseva, I. S. Tatarinov. Ecological Consequences of Extraction and Processing of Resources in the Siberian FD .....	295
44. E. A. Shiyan, V. Yu. Nemov. Economic issues of reproduction of the raw hydrocarbon base.....	302

*Научное издание*

# **ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ**

**XX Международный научный конгресс**

**Сборник материалов в 8 т.**

**Т. 2**

**Международная научная конференция**

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.  
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,  
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.  
ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

**№ 3**

**Материалы публикуются в авторской редакции**

**Компьютерная верстка *О. И. Голиков***

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 09.07.2024. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 18,25. Тираж 34 экз. Заказ 91.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.