

ЭНЕРГЕТИКА

Журнал основан в 1963 г.

Выходит 6 раз в год

Москва • “Наука”

№ 4

июль — август • 2018

Журнал издается под руководством Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН

РЕДКОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор академик **Э.П. Волков** (энергетика)

Зам. гл. редактора член.-корр. **П.А. Бутырин** (электротехника),

академик **Ю.С. Васильев** (гидротехника, экология),

член-корр. **Н.И. Воропай** (энергетика, электроэнергетика),

академик **К.С. Демирчян** (электротехника),

докт. физ.-мат. наук **Э.М. Карташов** (теплотехника), член-корр. **А.В. Клименко**

(теплоэнергетика), академик **А.С. Коротеев** (энергетика, в т.ч. космическая),

академик **А.И. Леонтьев** (теплотехника),

академик **А.А. Макаров** (Общая энергетика), академик **В.Е. Накоряков** (теплофизика),

член-корр. **Г.Г. Ольховский** (теплоэнергетика), академик **А.А. Саркисов** (атомная

энергетика), член-корр. **Э.Е. Сон** (электрофизика),

иностраный член РАН, профессор физики плазмы в Королевском технологическом институте в Стокгольме **Michal Tendler**, член международной академии ядерной энергии, сотрудник Европейского ядерного общества **Casimir Pierre Zaleski**

Отв. секретарь канд. техн. наук **М.А. Поляков**

СОДЕРЖАНИЕ

Уланов В.Л., Сазонов Д.Ю. Возобновляемые источники энергии как фактор риска развития российских энергетических компаний	3
Сухарев М.Г. Модели взаимодействия систем электро- и газоснабжения на современном этапе развития энергетики	14
Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Влияние горизонта прогнозирования и роста неопределенности на способы оценки конкурентоспособности новых электростанций	21
Сухарев М.Г., Косова К.О. Новые методы режимной диагностики, направленные на повышение надежности и безопасности функционирования систем магистрального трубопроводного транспорта	31
Цицикян Г.Н. О взаимной индуктивности и электродинамических силах взаимодействия коаксиальных контуров	40

Сергеев В.В., Владимиров Я.А., Зысин Л.В. Некоторые актуальные вопросы перехода к бивалентным системам при совершенствовании централизованного теплоснабжения	46
Крылов А.Л., Носов А.В., Арон Д.В., Меркушов В.П. Разработка расчетного программного комплекса “Бакис” для решения водных радиоэкологических задач	57
Драников И.Л. Задача Дыхне для распространения тепла	70
Каргашов Э.М., Ненахов Е.В. Термическая реакция массивного тела на тепловой удар на основе уравнений гиперболического типа	73
Зайченко В.М., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Цыплаков А.И. Горение обедненных смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием	87
Белоногов О.Б. Исследование влияния конструкционных и регулировочных параметров четырехдроссельного электрогидравлического усилителя на статические характеристики рулевой машины ракетного блока	100
Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Гришин Ю.М., Сидняев Н.И., Сиянский В.В., Ивашкин А.Б. О расчете напряжения зажигания обратного дугового разряда в высоковольтном плазменном термоэмиссионном диоде	108
Басов А.А., Велюханов В.И., Коптелов К.А., Пациевский А.А. Применение средненапорных установок воздушного термостатирования для охлаждения ка панельной компоновки при наземных испытаниях	116
Басов А.А., Лексин М.А., Прохоров Ю.М., Мякочин А.С. Устройство для воздушного охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. Методика расчёта тепловых и гидравлических характеристик	125

УДК 620.9:338.2

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ КАК ФАКТОР РИСКА
РАЗВИТИЯ РОССИЙСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ**

© 2018 г. В.Л. УЛАНОВ, Д.Ю. САЗОНОВ

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

E-mail: vulanov@hse.ru

При ограниченности энергетических ресурсов и росте затрат на их добычу для удовлетворения растущего спроса необходим поиск источников роста предложения и анализ различных подходов к развитию энергетики. Мировые энергетические лидеры уделяют внимание традиционным источникам, но также проявляют интерес к технологиям возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Причиной такого интереса являются не только истощение старых и отсутствие новых крупных месторождений. Это продиктовано экологическими требованиями, необходимостью диверсифицировать источники энергоснабжения, политикой энергетической безопасности и формирования стратегических запасов, готовностью компаний к современным тенденциям в энергетике и разработке новых технологических решений. Развитие ВИЭ становится фактором соперничества за технологическое лидерство. Согласно проекта энергетической стратегии России до 2035 г. в состав технологий «энергетической революции» входят ВИЭ и накопители энергии. Прогнозируется, что выпуск энергии с помощью ВИЭ, равное 1% от общей энергогенерации страны, будет достигнуто к 2020 г., но это противоречит декларациям важности ВИЭ.

Российские нефтегазодобывающие компании представляются в корпоративных стратегиях как энергетические, что должно означать повышенное внимание не только к сектору добычи углеводородов, но и развитие других направлений энергетики, в том числе ВИЭ. Современные стратегии и программы развития мало отражают меры по развитию альтернативных источников энергии. Это связано с тем, что эффективность предлагаемых зеленых технологий низкая, для российских условий выработка энергии традиционными способами эффективнее ВИЭ: не требуется привлечение дополнительных ресурсов, особых усилий и новаций.

Российские компании в отличие от западных мало инвестируют в развитие «зеленой» энергетики на уровне промышленных масштабов. Среди активов ВИЭ, например, компании ВР имеет крупнейшая биогазовая станция в Бразилии, 16 береговых ветряных электростанций в США, солнечные электростанции в Германии и США. В перспективе отсутствие такого направления инвестирования может означать потерю российскими энергетическими компаниями технологических перспектив и даже уход с позиций мировых энергетических лидеров.

Для обеспечения доли ВИЭ в энергетическом балансе в соответствии с проектом ЭС-2035 (более 3% от общей выработки электроэнергии к 2035 г.) необходимо инвестировать не менее 1,7 млрд долл. США ежегодно. Достижение 3% к 2035 г. только приблизит Россию к показателям, уже достигнутым развитыми экономиками.

Развитие частно-государственного партнерства, других инструментов государственной поддержки, ускорение технического прогресса сократят разрыв в технологическом развитии, снизят вероятность потери российскими компаниями доли на мировом энергетическом рынке.

Ключевые слова: энергетические ресурсы, энергосбережение, обеспеченность запасами, энергетическая безопасность, возобновляемые источники энергии, эффективность зеленых инвестиций, энергетическая стратегия, экологически чистая энергия, риски технологической отсталости.

RENEWABLE ENERGY SOURCES AS A RISK FACTOR FOR THE DEVELOPMENT OF RUSSIAN ENERGY COMPANIES

V.L. ULANOV, D. YU. SAZONOV

National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

E-mail: vulanov@hse.ru

With limited energy resources and increased costs for their extraction, to meet the growing demand, it is necessary to search for sources of supply growth and to analyze various approaches to the development of energy. World energy leaders pay great attention to traditional sources, but also show interest in renewable energy technologies (renewables). The reason for this interest is not only the depletion of old ones and the absence of new large deposits. This is dictated by environmental requirements, the need to diversify energy supply sources, energy security policy and the formation of strategic reserves, as well as companies' readiness for modern trends in energy and the development of new technological solutions. The development of renewables is becoming a factor of competition for technological leadership. According to the draft of the energy strategy of Russia until 2035 (ES-2035), the technologies of the "energy revolution" include renewables and energy storage. It is projected that the generation of energy using renewables, equal to 1% of the country's total energy generation, will be achieved by 2020, and this conflicts with declarations of the importance of renewables.

Russian oil and gas companies are represented in corporate strategies as energy, which should mean increased attention not only to the hydrocarbon production sector, but also the development of other energy sectors, including renewable energy sources. Modern development strategies and programs sparingly reflect measures to develop alternative energy sources. This is due to the fact that the efficiency of the proposed green technologies is still low and for Russian conditions, the generation of energy by traditional methods is more effective than renewables: no additional resources, special efforts and innovations, and creativity of managerial decisions are required.

Russian companies, unlike the Western ones, invest little in the development of "green" energy at the industrial scale. Among the renewable assets, for example, BP has the largest biogas station in Brazil, 16 onshore wind farms in the US, and solar power plants in Germany and the United States. In the long term, the lack of such a direction of investment can mean the loss of technological prospects by Russian energy companies and even the withdrawal from the position of world energy leaders.

To ensure the share of renewable energy in the energy balance in accordance with the project ES-2035 (more than 3% of the total power generation by 2035), it is necessary to invest at least \$1.7 billion annually. Achieving 3% by 2035 will only bring Russia closer to the indicators already achieved by developed economies.

The development of public-private partnerships, other instruments of state support, the acceleration of technological progress will narrow the gap in technological development, reduce the likelihood of Russian companies losing their share in the world energy market and the risk of occupying their place by those who are already actively investing in the development of clean energy.

Keywords: energy resources, energy saving, reserves security, energy security, renewable energy sources, efficiency of green investments, energy strategy, clean energy, risks of technological backwardness.

Становление ВИЭ и риски российских энергетических компаний

На фоне роста резкого колебания мировых цен на энергоресурсы, ужесточения экологических требований, истощения крупных месторождений углеводородов и проблем по поддержанию запасов нефти и газа возобновляемые источники энергии – ВИЭ (в статье не анализируются вопросы гидрогенерации, отделены в проекте энергетической стратегии России на период до 2035 [1]) рассматриваются рядом стран как возможность замены классических источников энергии. Инвестиции в ВИЭ (инвестиции в зеленую энергетику) превышают общемировые инвестиции в ископаемое топливо почти в два раза и составили в 2016 г. порядка 250 млрд долл. США [2]. Это отчасти связано с истощением классических энергетических ресурсов, согласно докладу World Energy Council

разведанных запасов нефти хватит человечеству на 56 лет, газа – на 55 лет, угля – чуть более чем на 100 лет [3]. Что касается России, то по данным министерства природных ресурсов запасов нефти хватит на 57 лет при уровне добычи 2015 г. в 505 млн т [4].

Развитие ВИЭ становится актуальным при непрерывном росте потребления энергии по всему миру, несмотря на повышение энергоэффективности [5]. В настоящее время мировое производство энергии составляет около 13 300 МТНЭ, рост более чем в два раза за последние полвека, на Россию приходится немногим более 5% (около 710 МТНЭ) [6]. ВИЭ с учетом истощения нефтегазовых запасов уже в ближайшее время могут начать играть ключевую роль в обеспечении мировой потребности в энергии, а также в стратегиях развития энергетических компаний и национальных программах энергоэффективности. У российских компаний топливно-энергетического комплекса коммерческий интерес к ВИЭ отсутствует, они развивают производство на основе традиционных технологий, отсюда – ограниченное финансирование технологических новшеств. Обратная тенденция прослеживается на мировом рынке, где активно развиваются ВИЭ, хотя они не могут открыто конкурировать с традиционными источниками энергии. ВИЭ не составляют конкуренцию углеводородному сырью ни как источники энергии, ни как источники сырья для химической и нефтехимической отраслей. В ближайшей перспективе развитие техники и технологий может изменить ситуацию.

Ведущие экономики мира уделяют повышенное внимание вопросам энергоэффективности и развитию ВИЭ как фактору сбережения углеводородов для газо- и нефтехимии. Например, для стран ЕС с 2006 г. основополагающим документом в сфере энергоэффективности является директива о «Повышении эффективности конечного использования энергии и энергетических услуг». В России существует государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», в которой утверждается, что потенциал энергосбережения и повышения энергетической эффективности составляет более 40% от уровня потребления энергии 2007 г. Достижение этого показателя может быть обеспечено и за счет ВИЭ, к 2022 г. ежегодная выработка электроэнергии с помощью ВИЭ достигнет 920 ГВт, на 100 ГВт больше, чем уровень 2016 г. [7].

Российские нефтегазовые компании скорректировали в корпоративных стратегиях свои названия на «энергетические», что должно привести к обновлению программ развития, развития не только нефтегазового сектора, но и других потенциальных энергетических направлений.

В российских условиях функционирования бизнеса многие проекты ВИЭ являются неконкурентоспособными по сравнению с традиционными. В отличие от отечественной экономики в ряде стран получение электроэнергии, например, с помощью солнечной электрогенерации обходится дешевле, чем производство электроэнергии из угля. ВЧ или ОАЭ стоимость 1кВт·ч, выработанного с помощью энергии солнца, была почти в два раза ниже, чем получение электроэнергии из угля и составляла 3 цента [8]. Аналогичная ситуация в Австралии, которая является одним из крупнейших производителей угля. Так, производство электроэнергии с помощью энергии ветра обходится в этой стране на 14% дешевле, чем выработка из угля и на 18% дешевле, чем из газа. Конкурентоспособность ВИЭ зависит от развития технологий и цен на оборудование. Стоимость солнечных панелей постоянно уменьшается и с 2009 г. к настоящему времени сократилась примерно на три четверти [8]. С ростом производства солнечных батарей затраты на них продолжают снижаться за счет условно-постоянных расходов. При увеличении производства в два раза стоимость солнечных панелей за счет эффекта масштаба, а также развития технологий, снижается на ~20%. В начале 1990-х гг. цена солнечной панели в Германии была ~ 14 тыс. евро за 1 кВт, в 2016 г. – ~ 1,3 тыс. евро за кВт [8]. Издержки производства энергоносителей и энергии из ВИЭ и далее будут сокращаться. Возникает определенная аналогия с добычей сланцевой нефти, которую ранее считали нерентабельным предприятием [9]. Возобновляемые источники энергии имеют неплохие шансы в ближайшем будущем рассматриваться как потенциальный конкурент классическим источникам энергии. Но существуют и определенные риски при полномасштабном переходе на ВИЭ. Такие

источники зависят от климатических условий и времени суток. В отсутствие солнечного света и постоянных ветров генерация электроэнергии проблематична. В ряде регионов из-за погодных условий может быть не достигнут достаточный уровень инсоляции для стабильной работы солнечной электростанции или местность не является достаточно ветряной. Данный вопрос мог бы отчасти решиться за счет развития единого и более качественного покрытия территорий страны электросетями, которые бы могли повлиять на привлекательность и дальнейшее развитие технологии ВИЭ. Добыча углеводородов также происходит только на ограниченных территориях страны. Сложностью при внедрении ВИЭ является отсутствие высококачественных накопителей энергии. Полномасштабный переход на ВИЭ невозможен: энергия, выработанная в течение солнечного дня, не может быть использована в ночное время, а при отказе оборудования не будет запаса электроэнергии для использования на период устранения неполадок.

Крупнейшие национальные энергетические корпорации, использующие для выработки электроэнергии классические виды топлива (газ, уголь или мазут), не рассматривают возможность значительных инвестиций в альтернативные источники. Для развития «зеленой» энергии необходимы различные меры государственного стимулирования [10], такие как субсидии или ограничения. Следует стимулировать инвестиции в экологически чистые источники энергии по примеру Китая, США, Индии, ряда стран Европы. Основные меры стимулирования, применяемые в мировой практике, приведены в табл. 1.

За 2015–2016 гг. было проведено 27 тендеров на строительство ветровых электростанций и 14 – на строительство солнечных электростанций общей мощностью чуть менее 1000 мВт [11], прироста недостаточно для достижения значений цели проекта ЭС-2035 (29–46 млрд кВт·ч к 2035 г.). Для достижения целевого показателя потребуется по примеру развитых экономик выработать более действенные планы по внедрению ВИЭ, а также проводить государственную политику по привлечению инвестиций, учитывать, что инвестор ожидает более высокой отдачи в рискованных проектах. Нестабильность экономики, непрозрачность отдельных решений, непредсказуемость российского законодательства являются основными вопросами инвесторов. Такого рода проблемы сказываются на кредитном рейтинге страны, который учитывается инвесторами при выборе страны инвестирования. Российская экономика проигрывает соревнование за инвестора, так, согласно S&P, Россия имеет рейтинг ВВ+, что сопоставимо с ЮАР или Индонезией, тогда как Китай, Германия и США имеют кредитные рейтинги АА-, ААА и АА+ соответственно.

Таблица 1

Меры экономического стимулирования ВИЭ, число

Меры поддержки	Год		
	2004	2014	2015–2016*
Энергетическая политика:	нет данных	112	114
Льготная политика (feed-in policy)	34	108	110
RPS/квоты	11	98	100
Проведение тендеров и аукционов	8	60	64
Установление обязательств, требований, норм по транспорту	10	64	66
Установление обязательств, требований, норм по отоплению	нет данных	21	21

Источники: Седаш Т. Н. Возобновляемые источники энергии: стимулирование инвестиций в России и за рубежом/ Российский внешнеэкономический вестник, 5–2016, С. 50–55, REN21 RENEWABLES2016GLOBAL STATUS REPORT

*Некоторые из показателей не пересматривались в 2016 году.

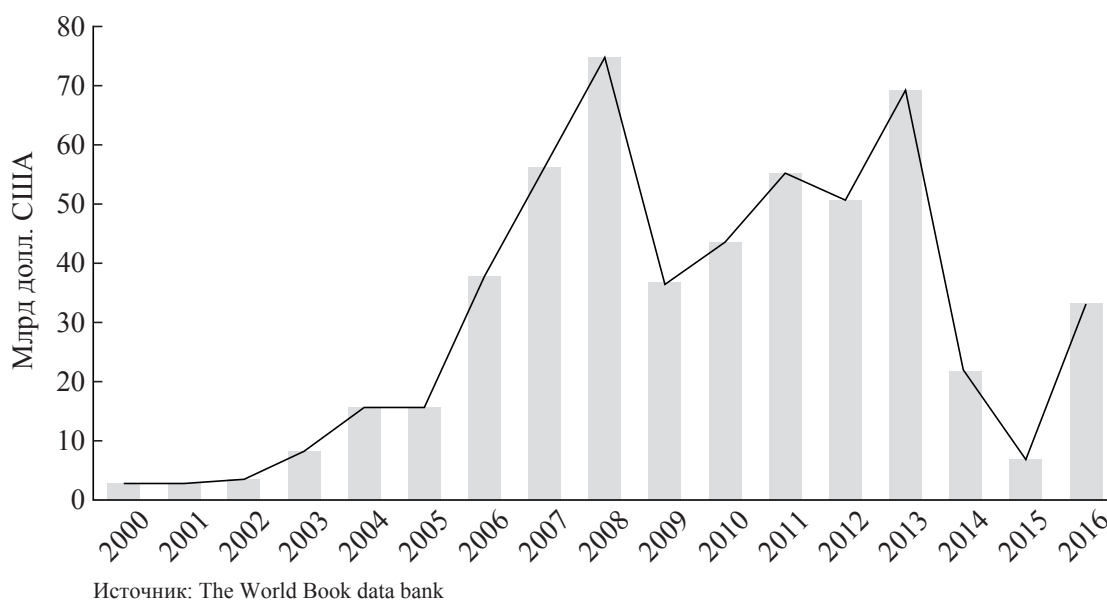


Рис. 1. Прямые иностранные инвестиции в Россию в 2000–2016 гг., млрд долл. США

Инвестиционные потребности ВИЭ

Анализ показывает, что средние капитальные затраты на 1 кВт ВИЭ (солнечная энергия и ветрогенерация) при строительстве электростанции составляют ~130 тыс. руб. или ~2.2 тыс. долл. [11]. Для достижения поставленной в проекте ЭС-2035 цели в 29–46 млрд кВт·ч к 2035 г. с учетом предположения, что установка мощностью 1 кВт за среднегодовые сутки может выработать ~4,7 кВт·ч, за год 1400 кВт·ч, и того, что в году не более 300 солнечных дней [12], потребуется строительство мощностей в 800–1300 мВт в год. Для строительства объектов такой мощности требуется ежегодное инвестирование 1.7–2.8 млрд долл. (без учета инвестиций в строительство и поддержание действующих мощностей) [13]. Но с учетом того, что до 2016 г. объем инвестиций падал, в ближайшее время развитие ВИЭ в российской экономике имеет довольно слабую перспективу (рис. 1).

Климатические факторы проектов ВИЭ

Внедрение ВИЭ считается для компаний затратным мероприятием, так как стоимость 1 кВт·ч выше, чем при традиционном производстве. К тому же это требует внедрения новых технологий и изменения корпоративной стратегии. В развитых странах особое внимание уделяется воздействию на окружающую среду, в связи с чем внедрение ВИЭ становится оправданным. По примеру Парижского климатического соглашения 2015 г. разработаны и приняты отдельные договоры и законодательные акты по защите окружающей среды. Например, в Германии предложено до 2030 г. отказаться от использования двигателей внутреннего сгорания, и компании, внедряющие зеленые технологии, будут предпочитать партнерство с тем, кто также инвестирует в развитие ВИЭ, так как сотрудничество с предприятиями, производящими большие выбросы в окружающую среду, будет влиять на рейтинги. В России и на территории СНГ до 2040 г. прогнозируется рост выбросов CO₂ до ~3000 млн т от текущих 2600 млн т [14], что противоречит общемировой тенденции по снижению выбросов парниковых газов и может отрицательно отразиться на инвестиционной привлекательности российской экономики.

Подписание и ратификация Парижского климатического соглашения (вступило в силу 4 ноября 2016 г.) является одним из показателей перехода мирового сообщества на экологически более чистую энергию. Соглашение подписано Россией, но его ратификация отложена до 2020 г. Этот фактор может привести к определенным ограничениям иностранных инвестиций. За последние два года более 680 финансовых институтов и 58 тыс.

частных инвесторов из-за антироссийских санкций (другие причины менее весомы) заявили о выводе капитала из России. Из них примерно 30% были реинвестированы в климатические проекты [15]. Задачей энергетических компаний становится поиск путей диверсификации существующего бизнеса в сторону «зеленой» энергетики, так как эта тенденция присуща современной экономике, и она может заинтересовать инвесторов.

Информационная открытость и инвестиционная привлекательность ВИЭ

Глобализация создала возможности финансирования, обмена технологиями и т.п., но и предъявила свои требования. Одно из условий – прозрачность, которая позволяет, снизив информационную асимметрию, повысить инвестиционную привлекательность. Несколько лет назад мировому бизнес-сообществу были представлены рекомендации по большей информационной открытости – инициатива прозрачности в добывающих отраслях (ИПДО) [16]. Среди участников такие нефтедобывающие страны как Азербайджан, Казахстан, Норвегия. Присоединение России к ИПДО не вызывает интереса у бизнес-сообщества и откладывается на неопределенный срок. Это означает, что действие современных рычагов влияния на привлекательность отечественных инвестиционных проектов будет отсрочено.

В связи с корректировкой приоритетов со стороны европейских партнеров появляются новые возможности: инвестиции в «зеленую» энергию, которые могут быть привлечены из ядерной энергетики. После аварии на Фукусиме правительство Германии отменило решение (октябрь 2010 г.) по продлению сроков эксплуатации атомных станций и к 2022 г. планирует вывести все из эксплуатации. Рядом стран ЕС также акцентировано внимание на выводе из эксплуатации атомных энергоблоков. В Италии на референдуме большинство проголосовало против атомной энергетики. В Швейцарии принято решение закрыть до 2034 г. все атомные электростанции. Следует учесть, что ~30% вырабатываемой энергии в ЕС генерируется на атомных электростанциях. И при отказе от атомной энергии, но росте потребления энергии в целом, потребуется замена существующих источников энергии. Возможно такой альтернативой будет ВИЭ (экологически чистая и возобновляемая энергия).

Энергетическая безопасность и развитие ВИЭ

Вопрос развития ВИЭ может быть актуален при обсуждении энергетической безопасности страны в целом и, особенно, ее отдельных регионов. Для этого анализируются вопросы построения стратегического резерва энергоресурсов. Государственные запасы развиваются в большинстве ведущих мировых держав как технология, позволяющая поддерживать стабильность в кризисных ситуациях. Многие страны формируют стратегические запасы нефти и нефтепродуктов. Бизнес, обеспечивая бесперебойную переработку нефти, создает запасы нефтяного сырья, которые позволяют непрерывно работать две-три недели в сложных ситуациях (техногенные, климатические катаклизмы и др. обстоятельства). Также существуют запасы нефти в трубопроводной системе, обеспечивающей доставку сырья с нефтепромыслов до потребителя. Среди государственных резервов самым крупным является американский государственный нефтяной резерв (Strategic Petroleum Reserve, SPR). Он сосредоточен недалеко от крупных североамериканских центров нефтепереработки. Нефтехранилища образованы путем бурения и растворения соли прокачиваемой водой. Объемы отдельных полостей составляют до 6 млн м³. В планах США довести SPR до 1 млрд барр. По данным департамента энергетики США объемы нефти в SPR выросли до 726 млн барр. в 2010 г., а в 2011 г. резерв уменьшился за счет продажи 30.64 млн барр. нефти из-за потери объемов добычи в Ливии. Наконец 2016 г. SPR составлял 695 млн барр. [17,18].

В России существуют различные точки зрения на формирование стратегического резерва энергоресурсов [19]. Для инвестирования в товарные запасы требуются большие средства, что приводит к замораживанию финансовых ресурсов, а возможности

**Инвестиции в ВИЭ крупнейшими нефтегазовыми компаниями
в локальные активы компаний**

Направления инвестиций, виды энергии						Ограниченные инвестиции
Ветровая	Солнечная	Биотопливо	Геотермальная	Приливная	Исследования	
BP	BP	BP	Chevron	StatoilHydro	BP	Газпром
Shell	Chevron	Shell			Chevron	Роснефть
StatoilHydro	Shell	StatoilHydro			ExxonMobil	Лукойл
SaudiAramco*	StatoilHydro	Total			Shell	
SaudiAramco*	Total				StatoilHydro	
					Total	

Источники: сайты нефтегазовых компаний

*В январе 2017 г. SaudiAramco совместно с GeneralElectric запустили ветровую электростанцию. Данное событие нацелено на выполнение национального плана по вводу к 2030 г. 9.5 гигавайт ВИЭ

инвестирования в другие доходные проекты, способные повысить эффективность, сокращаются. В случае избыточности запасов потребуются расходы на их распродажу по сниженным ценам, аренду дополнительных складских помещений, содержание и т.п. Обоснованные размеры запасов, диверсификация источников, их оптимальное территориальное размещение позволят рационально решить задачу снижения риска обеспечения бесперебойности снабжения ресурсами. Для обеспечения и поддержания энергетической безопасности должны использоваться ВИЭ. Актуален вопрос энергетической безопасности для отдаленных регионов страны, где отсутствует подключение к магистральным энергосистемам и установка автономных систем энергообеспечения на основе ВИЭ будет решением для конкретного региона.

Перспективы ВИЭ

Конкуренты российских нефтегазовых компаний, такие как BP, Exxon Mobil, Shell, Statoil, вкладывают огромные ресурсы в развитие ВИЭ. Британская компания BP развивает зеленые технологии, у компании существуют мощности по производству различных видов энергии. Согласно данным самой компании, среди активов BP, относящихся к ВИЭ, имеется крупнейшая биогазовая станция в Бразилии, 16 береговых ветряных электростанций в США, с помощью которых можно полностью обеспечить целый город, по размерам сопоставимый с г. Даллас (шт. Техас), две ветряные электростанции в Нидерландах, солнечные электростанции в Германии и США общей мощностью более 45 МВт. В 2016 г. ряд крупнейших мировых нефтегазовых компаний, среди которых Shell и Exxon Mobil, заявили о намерении увеличить свою активность в сфере развития зеленой энергетики, что в ближайшем будущем должно повлиять на общемировые тенденции развития ВИЭ. В табл. 2 приведены крупнейшие мировые нефтегазовые компании и направления их инвестирования в зеленую энергию.

Россия имеет достаточно высокий потенциал для развития ВИЭ в южных регионах страны. В Краснодарском крае, Ростовской обл., на Кавказе среднегодовой уровень поступления солнечной радиации составляет ~4–5 кВт·ч/1м² [12] в день, что соизмеримо с югом Германии или севером Испании (мировые лидеры по внедрению систем солнечной энергетики). Развитие ВИЭ в России не приобрело большой популярности, хотя кроме южных регионов страны, где высок потенциал для внедрения солнечных электростанций, такие установки могут быть жизнеспособны на Алтае, юге Сибири, Дальнем Востоке и в Забайкалье. В этих регионах количество солнечных дней в году составляет ~300 дней, что можно интерпретировать как 1400 кВт/м² в год [12].

ВИЭ в России составляет малую долю в энергопотреблении страны и достигнет 1% от общего объема потребления, согласно ЭС-2035, только к 2020 г. В проекте «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» предполагается рост ВИЭ в 2035 г. более чем в 20 раз (до 29–46 млрд кВт·ч с 2.3 млрд кВт·ч в 2015 г.), что составит ~3% от общего объема потребления, но нет способов реализации данного плана. Согласно основным направлениям повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования ВИЭ к 2020 г. общая установленная мощность всех энергогенерирующих объектов должна составлять 5.9 ГВт. Данные показатели ничтожны по сравнению с общемировыми, особенно с учетом того, что по ожиданиям к 2040 г. ВИЭ составят 14,7% от общемирового энергопотребления [20]. В Норвегии, которая входит в топ-10 стран по запасам нефти и газа, еще несколько лет назад (в 2013 г.) производство электроэнергии из ВИЭ составляло 5.2 ТВт·ч, то есть 4% от общего производства электроэнергии [21]. В 2016 г. правительство Норвегии приняло решение об увеличении инвестиций в ВИЭ в два раза. Германия планирует увеличивать мощности по 5 ГВт в год до 2020 г., и иметь мощности генерации ~6.5 ГВт от использований прибрежной энергии ветра. Китай к 2020 г. планирует иметь установленные мощности ~600 ГВт [22]. К 2020 г. Россия по использованию ВИЭ и, соответственно, уровню развития передовых энергетических технологий будет иметь отставание в несколько десятков раз. Активное развитие ВИЭ в Германии и Китае может в перспективе поставить под угрозу российский экспорт газа. Развитие ВИЭ стимулирует рост той или иной экономики за счет общего развития технологии и создания новых рабочих мест [23].

Слабое развитие ВИЭ связано с тем, что российские нефтяные гиганты не рассматривают ВИЭ в промышленных масштабах на территории страны. Компания «Газпром» использует ~100 автономных установок для генерации электроэнергии с помощью энергии солнца и ветра, но только для решения внутренних задач без перспектив. Схожая ситуация и в компании «Лукойл». Среди активов компании присутствуют ВИЭ, но они представлены инвестициями за рубежом. В 2015 г. Лукойл и итальянская компания ERG Renew подписали соглашение, в соответствии с которым Лукойл полностью консолидировал ветряную электростанцию ВЭС Land Power, находящуюся на территории Румынии.

В мировом бизнес-сообществе развитием «зеленой» энергетики занимаются нефтегазовые компании, а в России такие компании как РусГидро, Фортум, Росатом и Роснано. Это позволит занять им с учетом концепции технологического лидерства лидирующие позиции. В то время как нефтегазовые компании нацелены на выработку энергии на основе традиционных подходов, упомянутые выше компании активно развивают технологии по производству электроэнергии в сотрудничестве с мировыми лидерами в энергетике. Компания РусГидро имеет широкую практику работы с ВИЭ и благодаря этому выводит Россию в список пяти ведущих стран по наличию гидрогенерирующих мощностей. В отношении других источников энергии Россия не представлена в этом рейтинге (табл. 3) [22].

Компания РусГидро в основном занимается установкой мощностей, использующих ветровую энергию и энергию приливов. Крупный проект по строительству 100 МВт генерирующих мощностей с помощью энергии солнца разрабатывается компанией Фортум. Данный проект должен реализоваться на площадях Челябинской ГРЭС и компенсировать потери мощности во время реконструкции ГРЭС. Компании РусГидро и Ростех заявили о своем намерении создать совместный проект с компанией Siemens по строительству возобновляемых источников энергии на территории России. Ренова и Роснано в 2009 г. учредили компанию Nevel Solar, которая занимается производством солнечных панелей и научно-исследовательской деятельностью в области солнечной энергетики. В 2014 г. была введена первая в России солнечная электростанция по производству электроэнергии в промышленных масштабах. Подконтрольная Росатому Объединенная теплоэнергетическая компания (ОТЭК) заключила партнерство с голландским производителем ветряных электростанций Lagerway, и в 2017 г. создает совместное предприятие. До 2020 г. Газпромбанк выделит на строительство мощностей ВИЭ 65 млрд руб. Ростатом начал программу развития альтернативных источников энергии через дочернюю компанию

Топ-5 стран по генерации ВИЭ (включая гидро)

Тип электростанции / Рейтинг	1	2	3	4	5
Биогазовые	США	Китай	Германия	Бразилия	Япония
Геотермальные	США	Филиппины	Индонезия	Мексика	Новая Зеландия
Гидро	Китай	Бразилия	США	Канада	Россия
Солнечные	Китай	Германия	Япония	США	Италия
Ветровые	Китай	США	Германия	Индия	Испания

Источник: REN21: Renewables 2016 Global status report.

Ветро ОГК. Компании, с учетом практики их работы по данному направлению с начала 2000-х годов, в настоящее время ВИЭ уже имеют преимущество перед нефтегазовыми компаниями ~10 лет. Компании имеют собственные заводы по производству солнечных панелей, широкую практику установки солнечно- и ветрогенерирующих установок, и ряд партнерских соглашений с мировыми лидерами по разработке ВИЭ. Эти компании имеют портфель заказов до 2020 г. Однако данных объемов недостаточно для развития отрасли в масштабах всей страны, хотя дает технологическое конкурентное преимущество на локальном уровне.

Для выхода на уровень мировых лидеров в отрасли ВИЭ, требуется достижение поставленной в проекте ЭС-2035 цели уже к 2020 г., что, исходя из расчетов авторов, подразумевает увеличение инвестиций в четыре раза до 24 млрд долл. США ежегодно. Но объемы инвестирования могут возрасти, так как потребуются проведение закупок за рубежом, что дополнительно делает отечественную экономику зависимой от поставок иностранных технологий.

ВЫВОДЫ

Российские углеводороды на мировом рынке остаются конкурентоспособными. Проекты ВИЭ в российских условиях признаются затратными мероприятиями. В соответствии с проектом ЭС-2035 генерация энергии при помощи ВИЭ в России должна перейти значение в 1% к 2020 г., 3% – к 2035 г. Развитие частно-государственного партнерства и других инструментов государственной поддержки может ускорить развитие в данной сфере, ВИЭ могут стать реальным конкурентом классическим источникам энергии. В мире предлагаются технические решения по снижению затрат на выпуск солнечных батарей. Большое значение будет иметь техническое решение задачи по созданию накопителей энергии.

В ближайшей перспективе ВИЭ не составят конкуренцию на российском энергетическом рынке углеводородному сырью ни как источники энергии, ни как источники сырья для химической и нефтехимической отраслей. Развитие ВИЭ в настоящее время не влияет на экономику нефтегазовых компаний. Высокая экономическая эффективность традиционных технологий добычи углеводородов, отсутствие коммерческого интереса и вовлечения российских энергетических гигантов в новые технологические проекты, недостаточная государственная поддержка инноваций ведет ВИЭ. Из-за дефицита инвестиций может быть осложнено выполнение объема, намеченного национальной энергетической стратегией. Только для реализации проекта ЭС-2035 требуется ~2 млрд долл. ежегодно (без учета развития и поддержания существующих производств). Для получения показателей мировых энергетических лидеров потребуются рост инвестиций в несколько раз.

В мировой практике ВИЭ признаны не только как фактор диверсификации, но и как драйвер технического прогресса, повышения технологической конкурентоспособности нефтегазовых компаний и национальных экономик. Высокая эффективность

традиционных подходов и отсутствие заинтересованности в ВИЭ консервирует технологическое состояние российских нефтегазовых компаний, то есть отставание перед крупнейшими иностранными компаниями этой отрасли, такими как BP, ExxonMobil, Shell, Statoil. В России сейчас такие компании как РусГидро, Фортум, Росатом и Роснао имеют отрыв по технологиям почти на 10 лет от российских нефтегазовых гигантов. Вовлеченность российских компаний в развитие «зеленой» энергетики должна улучшить состояние отрасли, обеспечить поддержание энергетической безопасности и сократить технологический разрыв между Россией и мировыми лидерами ВИЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проект энергостратегии Российской Федерации на период до 2035 года (редакция от 01.02.2017). Министерство энергетики. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920>
2. Renewables 2017 GlobalStatusReport. REN21. 2017. Paris: REN21 Secretariat. URL: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>
3. Данные интернет-портала ОАО «НК «Роснефть» URL: <http://www.rosneft.ru/news/pressrelease/21012014.html> (дата обращения 09 Апреля 2017)
4. Интернет-портал Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации URL: http://www.mnr.gov.ru/news/detail.php?ID=343750&sphrase_id=4325810
5. *Мотулевич А. В.* Перспективы использования возобновляемой энергетики в России и за рубежом // Надежность и безопасность энергетики. 2016. № 3 (34). С. 2–5.
6. BP Statistical Review of World Energy June 2017. British Petroleum. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
7. Renewables 2017. International Energy Agency. URL: <http://www.iea.org/renewables/>
8. The falling costs of renewable energy: no more excuses. IRENA, 2015 URL: <https://irenanewsroom.org/2015/12/29/the-falling-costs-of-renewable-energy-no-more-excuses>
9. *Архипов Н. А., Буряк Е. В. и др.* Эволюция мировых энергетических рынков и ее последствия для России. М.: ИНЭИ РАН, 2015.
10. *Кавешников Н. Ю.* Возобновляемая энергетика в ЕС: смена приоритетов // Мировая экономика и международные отношения. 2014. № 12. С. 70–81.
11. Администратор торговой системы. URL: <http://www.atsenergo.ru/vie/proresults>
12. Данные компании HevelSolar. URL: <http://www.hevelsolar.com/solar/faq/#a1>
13. *Дегтярев К. С., Залиханов А. М., Соловьев А. А., Соловьев Д. А.* К вопросу об экономике возобновляемых источников энергии // Энергия, экономика, техника, экология. 2016. № 10. С. 10–20.
14. *Кулагин В. А., Архипов Н. А. и др.* Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 г. М.: ИНЭИ РАН, 2014.
15. The Global Fossil Fuel Divestment and Clean Energy Investment Movement Arabella Advisors. URL: https://www.arabellaadvisors.com/wp-content/uploads/2016/12/Global_Divestment_Report_2016.pdf
16. Инициатива прозрачности добывающих отраслей. EITI. URL: <https://eiti.org/standard/overview>
17. *Амзин А. Беспольный Н. З.* Экономисты призвали США уничтожить стратегический нефтяной резерв. URL: <https://lenta.ru/articles/2005/12/06/oil/>
18. Данные департамента энергетики США. EIA. URL: <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=WCSSTUS1&f=W>
19. *Уланов В. Л., Ковалева А. И.* О формировании стратегического резерва нефти в России в целях обеспечения экономической безопасности и макроэкономической стабильности // Управленческие науки. 2017. № 2. С. 6–14.

20. Renewable energy production in Norway. Интернет-портал правительства Норвегии. URL: <https://www.regjeringen.no/en/topics/energy/renewable-energy/renewable-energy-production-in-norway/id2343462/>
21. Renewables 2016 Global status report. REN21. URL: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf
22. *Daniel M. Kammen, Kamal Kapadia, Matthias Fripp*. Putting Renewables to Work: How Many Jobs Can the Clean Energy Industry Generate? // Report of The Renewable and Appropriate Energy Laboratory. Univer. California, Berkeley, 13 April, 2004.

УДК 620.98:621.6

**МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРО- И ГАЗОСНАБЖЕНИЯ
НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ**

© 2018 г. М.Г. СУХАРЕВ

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», Москва, Россия*

E-mail: mgsukharev@mail.ru

В работе отмечается актуальность создания гибридных систем электро- и газоснабжения с использованием газогенераторов, что объясняется прогрессом конструкций и снижением стоимости генераторов и ростом использования ВИЭ в производстве электроэнергии. Решение методических задач, связанных с функционированием и надежностью гибридных систем, позволит оптимизировать структуру систем энергообеспечения территорий с учетом возрастающего значения ВИЭ и повысить надежность электроснабжения потребителей. Математический аппарат для координированного управления гибридными, взаимосвязанными системами электро- и газоснабжения должен адекватно учитывать динамику изменения количества газа, аккумулированного в трубах. Дается краткая характеристика зарубежных публикаций, где исследуется эта проблема, отмечаются отечественные разработки. Как одно из перспективных направлений развития газового хозяйства в изменяющейся энергетической конъюнктуре рассматривается локальная газификация на базе сжиженного природного газа. Обоснована целесообразность разработки экономических и технологических моделей гибридных систем, когда локальная система газификации используется как единственный источник для выработки электроэнергии. Перечислены новые задачи анализа и синтеза надежности, возникающие при создании гибридных систем.

Ключевые слова: электроснабжающая система, газоснабжающая система, газогенераторы, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), гибридные системы, модели с сосредоточенными параметрами, анализ и синтез надежности.

**MODELS OF INTERACTION BETWEEN POWER AND GAS SUPPLY SYSTEMS
AT THE PRESENT STAGE OF ENERGY DEVELOPMENT**

M.G. SUKHAREV

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia

E-mail: mgsukharev@mail.ru

The paper stresses the importance of creating hybrid (electricity and gas) systems using gas-fired generators. This will allow to optimize the structure of energy supply systems, including RES, to improve the reliability of electric power supply to consumers. It is emphasized that the mathematical apparatus for solving the problem of coordinated control of hybrid systems must adequately take into account the line-pack effect. As one of the promising directions

for the development of the gas infrastructure development in a changing energy situation, local gasification based on LNG is being considered. The expediency of economic and technological development of models of hybrid systems is justified, when the local gasification system is also used as the only source for power generation. New problems of analysis and synthesis of reliability, arising in connection with the creation of hybrid systems, are listed.

Keywords: power supply system, gas supply system, gas-fired generators, renewable energy sources (RES), hybrid systems, lumped models, analysis and synthesis of reliability

Причины появления и перспективы развития гибридных систем. Одним из направлений в проблеме интеллектуальных сетей является взаимодействие систем электро- и газоснабжения и их скоординированное управление. Значение проблемы объясняется рядом факторов, из них основные – увеличение доли возобновляемых источников в структуре генерации электроэнергии и техническое совершенствование газогенераторов для выработки электроэнергии на природном газе. Эти факторы являются долговременными и приводят к революционным изменениям в энергетике. Из-за капиталоемкости энергетического хозяйства изменения не могут произойти быстро, процессы модернизации и перехода на новые технологии весьма инерционны. Однако эти процессы определяют направление вектора развития энергетики в ближайшие десятилетия. Сознавая неизбежность перемен, к ним надо заблаговременно подготовиться.

Установки, использующие возобновляемые источники энергии, прежде всего, ветровые генераторы (ветряки) и солнечные батареи имеют неоспоримые достоинства. Они относительно дешевы, их негативное влияние на окружающую среду пренебрежимо мало по сравнению с традиционными способами выработки энергии: углеводородной, атомной, гидроэнергетикой. Солнечные батареи или панели успешно применяются в качестве основного и альтернативного источников энергии. Объекты, где устанавливаются батареи, различные. Солнечные панели позволяют не только обрести энергетическую независимость, но и уменьшить или исключить расходы на электричество. Батареи, как запасной источник энергии чрезвычайно важны в заведениях, для деятельности которых необходима бесперебойная работа аппаратуры. Батареи особенно ценны для объектов, отдаленных от мест централизованного электроснабжения.

Для многих территорий неоспоримы преимущества ветровых генераторов. В Дании ~40% всей потребляемой энергии вырабатывается ветряками. Имели место случаи, когда ветровая энергия не только полностью покрывала потребности этой страны, но и позволяла экспортировать излишки.

Единственный существенный недостаток упомянутых ВИЭ – зависимость от погодных условий. Выявить преимущества ВИЭ позволяет их комбинированное использование с генераторами, работающими на природном газе.

Современный рынок предлагает широкий выбор газогенераторов (ГЗГ) разных производителей мощностью от 2 до 500 кВт. Рентабельность использования ГЗГ рассчитывается, так на выработку 1 кВт·ч электроэнергии необходимо от 0,3 до 0,4 м³ природного газа, при стоимости 5–6 руб. за м³ это составляет 1,5–2,4 руб. Тарифы за электроэнергию для большей части регионов РФ – от 3 до 4 руб./кВт·ч, в Москве ~ 6 руб. Преимущества ГЗГ очевидны. В личном хозяйстве, мелком и среднем бизнесе ГЗГ должны быстро окупиться. Очевидны преимущества ГЗГ перед генераторами на дизельном топливе: стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, выработанной ГЗГ, примерно в четыре раза ниже.

При использовании ГЗГ как источника электроэнергии наряду с ВИЭ к функционированию системы газоснабжения предъявляются особые требования. Графики поставок газа потребителям в суточном цикле характеризуются неравномерностью. Обычно это ночной провал и более высокий в среднем, но изменяющийся уровень подачи в дневное и вечернее время, на эти циклические изменения накладывается еще ациклическая неравномерность, вызванная изменениями погоды.

Расширение номенклатуры ГЗГ, улучшение их качества и снижение стоимости стали стимулом к появлению новых задач в сфере управления системами магистрального

транспорта и распределения природного газа. В работах [1–6] предложены подходы к решению этих задач. В работах [1–5] построены модели скоординированного управления крупномасштабной системой электроснабжения (ЭСС) и газоснабжающей системой (ГСС). Дефицит электроэнергии погашается (или снижается) работой ГЗГ, обеспечивающих меняющийся в суточном цикле спрос на электроэнергию. Наибольший интерес представляет то, как именно учтен эффект нестационарности течения. Газодинамическая модель должна быть с одной стороны достаточно точной, с другой – максимально простой, не содержать деталей, оказывающих второстепенное влияние на исследуемые процессы.

Новые проблемы моделирования ГСС. Краткий обзор публикаций. Для системы газоснабжения необходим учет динамики аккумулированного газа, поэтому используются уравнения нестационарного течения. Такие течения обычно описывают системой уравнений в частных производных – моделью с распределенными параметрами (МРП). Она связывает режимные параметры газового потока с временной и пространственной переменными t , x . Течение в трубах считается одномерным, то есть значения параметров по сечению с координатой x , перпендикулярному оси трубы, одинаковы. Эта модель является эталонной. Но она сложна для исследования эффекта аккумулирования газа в крупномасштабных ГСС. Поэтому следует построить более простые модели, использующие обыкновенные дифференциальные уравнения для функций времени t , то есть модели с сосредоточенными параметрами (МСП). Такие модели предложены, в частности, в работах [1–5]. Простейший эквивалент МРП получается при замене производных по пространственной координате в МРП их конечноразностными аналогами. Методики интегрирования уравнений в [1–5] иллюстрируются примерами расчета на модельных и реальных газопроводах.

В работе [1] поставлена задача определения режима ГСС, оптимального по минимуму затрат на компримирование газа. Приводятся результаты моделирования цепочки – системы последовательно соединенных элементов: трубопроводов и компрессоров. Учитывается возможность промежуточных отборов. В применении к крупной системе магистрального транспорта газа динамическая, нестационарная модель сравнивается со статической, оптимальное управление – с режимом при постоянной степени сжатия компрессоров.

В работе [2] для характеристики течения используется практически та же модель, что и в [1] в применении к системам сложной конфигурации (тупикового типа). Наряду с критерием минимума энергетических затрат рассматривается критерий максимального удовлетворения спроса на газ. Приводятся результаты расчетов двух примеров: простой системы трех газопроводов с одной точкой стыка и промышленной системы, поставляющей газ восьми потребителям из одного источника и включающей пять компрессоров. Показано, насколько решение зависит от критерия оптимизации.

В работе [3] исследованы варианты управления взаимосвязанных систем электро- и газоснабжения. Рассмотрен базовый пример (IEEE RTS96): ЭСС содержит 24 потребителя, несколько генераторов энергии, в их число входят четыре газогенератора. ГСС содержит 24 трубопровода и пять компрессоров (газоперекачивающих агрегатов). Критерий оптимизации учитывает затраты на топливный газ и стоимость энергии, поставляемой в СЭС от других источников. Рассмотрены различные стратегии управления ГСС.

В работе [4] исследуется та же ситуация, что и в [3]. Для имитации нестационарного течения по системе используется дискретизация по пространственной переменной с укрупненными элементами. Сопоставляются динамическая и статическая модели течения. Показано, что последняя может приводить к технологически нереализуемым решениям. Путем сравнения решений с учетом и без учета нестационарности течения в суточном цикле доказано, что при учете существенно снижается дефицит пикового потребления. Следует отметить, что модели газоперекачивающих агрегатов в работах [1–4] не отражают всех технологических ограничений.

В работе [5] исследовано совместное функционирования ЭСС и ГСС штата Иллинойс. Исследуются стратегии некоординированного и координированного видов управления ЭСС и ГСС. Показано, что в последнем случае могут выиграть оба игрока: ЭСС – за счет более полного удовлетворения спроса на энергию, ГСС – за счет увеличения продаж газа. Работа [5] позволяет оценить практические возможности применяемого аппарата моделирования.

Литературный обзор [6] содержит представительный список англоязычных публикаций по проблеме динамики течений газа на период до 2014 г.

Исследования по управлению большими ГСС при нестационарном течении проводятся в нашей стране [7–10]. В [10] показано, как эти исследования позволяют обосновать мероприятия, способствующие повышению живучести ГСС. Разработанная и использованная в [7–10] МСП обладает не меньшими возможностями, чем модели [1–5].

Приведенный анализ сравнительно новых исследований по координированному управлению системами электро- и газоснабжения свидетельствует о том, что эти исследования имеют чисто прикладной характер и открывают новую страницу в сфере управления большими системами энергетики. Ситуациям, рассмотренным в публикациях, нет аналогов в российской энергетике. Ассортимент газогенераторов на рынке широк, цены доступны, казалось бы, что мешает их использованию для выработки электроэнергии в период суточного максимума и в пиковых ситуациях, как это делается в штате Иллинойс. Но автору такие прецеденты не известны. Следует надеяться, что тенденции развития мировой энергетики дойдут и до России и координированное развитие систем электро- и газоснабжения и управление ими будет нормой.

Режимная взаимосвязь ЭСС и ГСС. Взаимодействие этих систем имеет место и в настоящее время. В Москве ~80% поступающего газа идет на выработку тепла и электричества. Спрос на электроэнергию существенно изменяется в суточном, недельном и годовом периодах. От этих колебаний зависит неравномерность потребления газа, то есть нестационарность режимов ГСС. Однако эта взаимосвязь не находит применения при взаимодействии служб, осуществляющих оперативное управление системами. Аналогичная ситуация имеет место и в других регионах.

На рис. 1 приведен график расхода газа через одну из газораспределительных станций (ГРС) г. Пермь. Основной потребитель этой ГРС – теплоэлектроцентраль. График имеет выраженный циклический характер. Часовые расходы колеблются от 96 до 150 тыс. м³/ч. Заметны тенденции повышения и снижения среднесуточной подачи во времени, обусловленные изменением погодных условий. На рис. 2 даны графики суточного изменения расхода за четыре декабрьских дня. Потребление газа ТЭЦ может иметь некоторый сдвиг во времени от графиков спроса на тепло- и электроэнергию, но зависит от них.

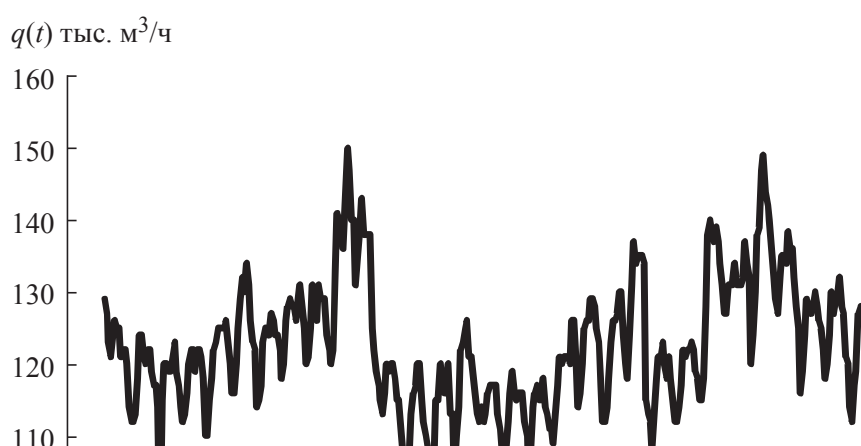


Рис. 1. Подача газа через ГРС-1 г. Пермь за декабрь 2003 г.

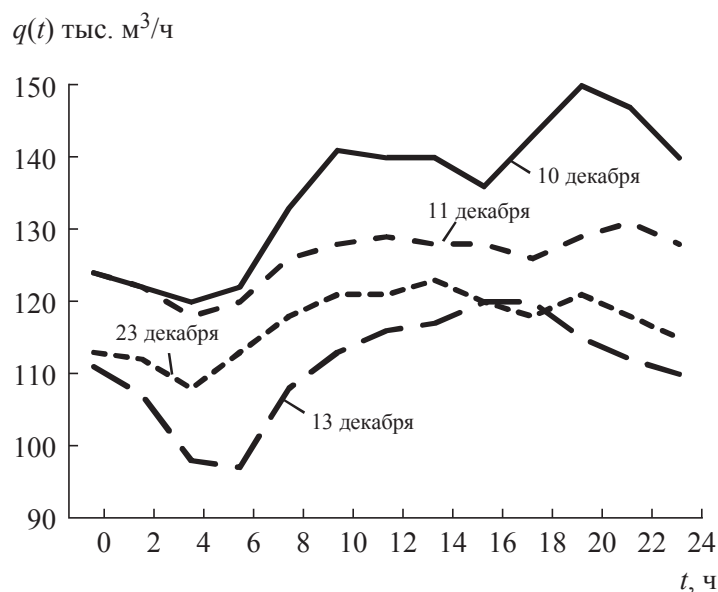


Рис. 2. Графики суточной подачи газа через ГРС-1 г. Пермь за 10, 11, 23, 13 декабря

Зависимость режимов ЭСС и ГСС очевидна, она будет возрастать по мере увеличения доли ВИЭ в балансе производства электроэнергии. Это свидетельствует о целесообразности разработки моделей гибридных систем. Модели позволяют оценить технологические и экономические эффекты от мероприятий по организации и совершенствованию таких систем, найти оптимальные варианты их структуры и подготовить регламенты управления ими.

Перспективы использования СПГ в гибридных системах. Сжиженный природный газ (СПГ) всё более используется в мировой энергетике. Развиваются технологии сжижения, транспорта, регазификации, растут объемы производства и расширяется сфера применения. Но газовая отрасль России мало использует эти технологии. Участие ОАО «Газпром» в проекте Сахалин II по сути дела ограничилось использованием зарубежного оборудования и технологий. Оно не привело к реализации новых масштабных проектов и не дало импульса к развитию отечественных технологий. Более восприимчивыми к нововведениям оказались так называемые независимые производители, прежде всего, НОВАТЭК. Успешно реализуется проект Сабетта (по названию вахтового поселка на берегу Обской губы). Завершено сооружение первой производственной линии завода по сжижению газа, построены морской порт и аэродром. Через Северный Ледовитый океан на мировой рынок начался вывоз СПГ.

Реализуются и менее масштабные проекты с использованием СПГ. В 2017 г. Газпром объявил о разработке такого проекта в рамках программы газификации регионов России. Проект предусматривает строительство мини-завода СПГ мощностью 40 тыс. т/год в Большесельском районе Ярославской обл., что позволит проводить локальную газификацию на территориях области и реализовывать программы перевода автотранспорта на газомоторное топливо. Применение СПГ делает дешевле в два раза 1 км пробега транспортного средства. Объектом локальной газификации является в частности Брейтовский район, единственный негазифицированный в области. Он располагается недалеко от населенного пункта Большое Село, где будет построен завод сжижения. Предполагается перевести на СПГ более 80 котельных, работающих на мазуте.

Этот проект, вероятно, может в идейном плане послужить базой для ещё одного варианта гибридной сети, который будет предусматривать применение СПГ не только как топлива для котельных.

Этот проект, вероятно, может быть развернут и в идейном плане послужить базой для ещё одного варианта гибридной сети, так как СПГ будет применяться не только как топливо для котельных, но и для газогенераторов, обеспечивающих электроэнергией населенные пункты на территориях с низкой плотностью населения. В этом случае не будет необходимости строительства распределительных электросетей, что важно для малозаселенных территорий со значительными расстояниями между населенными пунктами. Такой подход к электрификации территорий не только может снизить стоимость эксплуатации объектов ЭСС, но и повысить надежность электроснабжения, так как система не будет содержать ЛЭП, объектов, наиболее подверженных природным воздействиям. Концепция локальной электрификации должна быть всесторонне изучена. Есть вероятность, что она окажется востребованной при решении проблем энергообеспечения обширных территорий Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Следует сделать ещё одно замечание. При планировании развития ЭСС и ГСС взаимодействие систем не учитывалось в должной степени. В результате при выборе структуры и мощностей этих систем были допущены просчеты.

Эти исследования открывают, на наш взгляд, новую страницу в теории надежности больших систем энергетики. Можно наметить следующие первоочередные задачи на этом направлении.

Актуальные задачи анализа и синтеза надежности гибридных систем

Перспективы развития гибридных сетей, по мнению автора, ставят новые задачи в теории надежности больших систем энергетики, в том числе:

1. Построить модель оценки надежности ЭСС, управление которой координировано с работой газогенераторов. Ввести показатели надежности, получить оценки показателей в зависимости от принципов координации управления ЭСС и ГСС.

2. Построить модели оценки надежности локальной системы энергообеспечения клиента для варианта комбинированного использования электросети, ВИЭ и газогенераторов (частный случай – ВИЭ и газогенератор).

3. Для варианта комбинированного использования электросети, ВИЭ и газогенераторов построить модель выбора рациональных параметров технологических компонентов системы, включая емкость аккумуляторов энергии (электричества и тепла) и объем резервуара для СПГ.

4. Разработать методы составления оптимальных графиков ремонта оборудования гибридных систем.

5. Разработать рекомендации по обоснованию стратегии газификации территории (разделив подлежащие газификации населенные пункты на группы по видам снабжения: сетевой газ, локальное газоснабжение сжиженными углеводородными газами (пропан, бутан), локальное газоснабжение СПГ).

6. Провести сопоставление на многокритериальной основе вариантов электрообеспечения территории (функционирование в рамках ЕЭС, локальное с газогенераторами на СПГ и др.).

ВЫВОДЫ

1. Использование газогенераторов в энергоснабжении населенных пунктов и территорий имеет хорошие перспективы для энергетики XXI века.

2. Целесообразно координировать планирование развития и оперативное управление гибридными (электро- и газоснабжающими) системами.

3. При моделировании режимов гибридных систем необходимо учитывать динамику изменения аккумулированного в трубах газа. Для решения возникающих задач разработано математическое, алгоритмическое и программное обеспечение.

4. Современный уровень технологий по сжижению и регазификации природного газа обеспечивает конкурентоспособность автономной, на базе СПГ, газификации населенных пунктов.

5. Целесообразно провести комплексное изучение проблем автономной электрификации населенных пунктов и территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Zlotnik A., Dyachenko S., Backhaus S., Chertkov M.* Model reduction and optimization of natural gas pipeline dynamics // *Proceed. of ASME. 2015. Dynamic Systems and Control Conf. 2015, Oct 28–30. Columbus, Ohio, USA.*— 2015. V. 3.
2. *Zlotnik A., Chertkov M., Backhaus S.* Optimal control of transient flow in natural gas networks // *Proceed. of 2015 54th IEEE Conf. on Decision and Control. Dec 15–18, Osaka, Japan.*
3. *Zlotnik A., Roald L., Backhaus S., Chertkov M., Anderson G.* Control policies for operational coordination of electric power and natural gas transmission systems // *Proceed. of American Control Conf. 2016, Jul 6–8, Boston, MA, USA.*
4. *Yang J., Zhang N., Kang Ch., Pinson P.* Modeling the transient security constraints of natural gas network in day-ahead power system scheduling // *Proceed. of IEEE PES General Meeting. 2017, Jul 16–20, Chicago, IL, USA.*
5. *Chiang N-Y., Zavala V.M.* Large-scale optimal control of interconnected natural gas and electrical transmission systems // *Appl. Energy. 2016. V. 168. P. 226–235.*
6. *Ríos-Mercado R.Z., Borraz-Sánchez C.* Optimization problems in natural gas transportation systems: A state-of-the-art review // *Appl. Energy. 2014. V. 147. P. 536–555.*
7. *Сухарев М.Г., Самойлов Р.В.* Оптимальное управление магистральным газопроводом при нестационарном режиме течения // *Известия РАН. Энергетика. 2001. № 5. С. 83–92.*
8. *Сухарев М.Г., Панкратов В.С., Самойлов Р.В.* Оптимизация нестационарных режимов действующих магистральных газопроводов // *Газовая промышленность. 2002. № 9. С. 72–75.*
9. *Сухарев М.Г., Самойлов Р.В.* Анализ и управление стационарными и нестационарными режимами транспорта газа. М.: Российский гос. универс. нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2016. 399 с.
10. *Сухарев М.Г., Попов Р.В.* Модель исследования живучести крупных газотранспортных систем в экстремальных погодных условиях. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 66. Актуальные проблемы надежности систем энергетики / Отв. ред. Н.И. Воропай, М.А. Короткевич, А.А. Михалевич. Минск: БНТУ, 2015. С. 280–286.
11. Газпром построит завод СПГ в Ярославской области [Электронный ресурс] // *Ярославский регион. 2017. 18 апреля.* Режим доступа: <https://yarreg.ru/articles/v-yaroslavskoy-oblasti-postroyat-zavod-po-s/>

УДК 621.311:338.27

**ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
И РОСТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА СПОСОБЫ ОЦЕНКИ
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ НОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

© 2018 г. Ю.Д. КОНОНОВ, Д.Ю. КОНОНОВ

ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, (ИСЭМ СО РАН) Иркутск

E-mail: kononov@isem.irk.ru

Рассматриваются проблемы комплексной оценки сравнительной эффективности разных электростанций в условиях неопределенности и усложнения взаимосвязей энергетики и экономики. Анализируются зарубежные данные об изменении технико-экономических показателей новых электростанций. Показана важность учета при сравнении проектов и при выборе рациональной структуры электростанций инвестиционных рисков. Предложены способы их оценки. Обоснована целесообразность использования для комплексной оценки общественной эффективности вариантов энергоснабжения системы оптимизационных и стохастических моделей, состав которых зависит от горизонта прогнозирования. Приводятся результаты экспериментальных расчетов, которые показали влияние на общественную эффективность вариантов ввода новых мощностей: характера неопределенности исходных данных, принимаемых в расчетах значений коэффициента дисконтирования (его рискованной составляющей), степени агрегирования моделей.

Ключевые слова: электростанции, сравнительная эффективность, прогнозирование, неопределенность, инвестиционные риски.

**IMPACT OF FORECASTING HORIZON AND UNCERTAINTY INCREASE ON THE
METHODS FOR COMPETITIVENESS ASSESSMENT OF NEW POWER PLANTS**

Yu.D. KONONOV, D.Yu. KONONOV

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

E-mail: kononov@isem.irk.ru

The paper deals with the problem of integrated assessment of comparative effectiveness of different types of power plants in terms of increasing uncertainty and complication of energy-economy interrelations. The foreign data on variation in technical and economic indicators of new power plants are analyzed. It is important to consider investment risks when comparing the projects and choosing the rational structure of power plants. The methods for their quantitative evaluation are suggested. Expediency of using a system of optimization and stochastic models for integrated assessment of social effectiveness is justified. The composition of models is showed to depend on the forecasting horizon. The results of performed experimental calculations revealed a possible pronounced impact of the options for new capacity commissioning on social effectiveness: nature of initial data uncertainty, values of the discount factor (its risk component) assumed in calculations, level of model aggregation.

Keywords: power plants, comparative effectiveness, forecasting, uncertainty.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ экономической эффективности новых электростанций и определение их рациональной структуры является важной составляющей в многоэтапном процессе, включающем: подготовку энергетической стратегии России (на перспективу до 25 лет), разработку Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики (перспектива до 15–20 лет) и Программу развития Единой энергетической системы России (перспектива до 10 лет). На основании этих долгосрочных и среднесрочных государственных прогнозов энергетические (генерирующие) компании разрабатывают инвестиционные проекты и программы. Информация об инвестиционных проектах позволяет вносить коррективы в Генеральную схему и в программу развития электроэнергетики. Итеративному процессу принятия стратегических решений предшествуют прогнозные исследования развития ТЭК страны при разных сценариях экономического роста и научно-технического прогресса.

Сложность и условность оценки конкурентоспособности разных типов электростанций обусловлены: неопределенностью условий их развития и функционирования, существенными и изменяющимися во времени различиями в технико-экономических показателях новых электростанций (табл. 1), усложнением взаимосвязей между системами разного иерархического уровня (рис. 1).

Определение рациональных вариантов развития электроэнергетических систем и компаний связано с оптимизацией и использованием совокупности критериев, отражающих: затраты на развитие ЭЭС и ожидаемые доходы, надежность электроснабжения потребителей, качество электроэнергии, влияние электростанций на экологию и др. Анализ применения многокритериальных методов обоснования решений в энергетике приведен, например, в [4,5].

Традиционный подход к учету многокритериальности при решении задач обоснования развития электроэнергетики состоит в сведении задачи к однокритериальной путем выделения главного и перевода остальных критериев в разряд ограничений. В качестве такого критерия в оптимизационных расчетах обычно принимаются приведенные затраты, объединяющие посредством коэффициента (нормы) дисконтирования капиталовложения и эксплуатационные издержки.

Обоснование развития электроэнергетики, разработка государственной энергетической политики и стратегические решения генерирующих компаний базируются на долгосрочных прогнозах развития ТЭК страны.

Методический аппарат прогнозирования ТЭК совершенствовался путем усложнения используемых экономико-математических моделей и создания модельно-компьютерных

Таблица 1

Ориентировочные значения технико-экономических показателей передовых электростанций [1–3]

Тип станции	Удельные капиталовложения, долл./кВт	Коэффициент использования мощности, %	Стоимость генерации	
			цент/к·Втч	ожидаемое снижение, %
Угольные	1100–2300	70–85	8–12	10
Газовые (ПГУ)	760–970	60–80	7.5–14	2
АЭС	3570–6520	85–92	4.5–13	10
Ветровые (на суше)	1600–1830	20–46	5–20	10–12
Солнечные (фотоэлементы)	1600–1800	12–21	11–22	18–30
На биомассе	1540–1700	60–85	8–15	9–11
ГЭС (крупные)	1590–4150	20–75	2.4–19	5

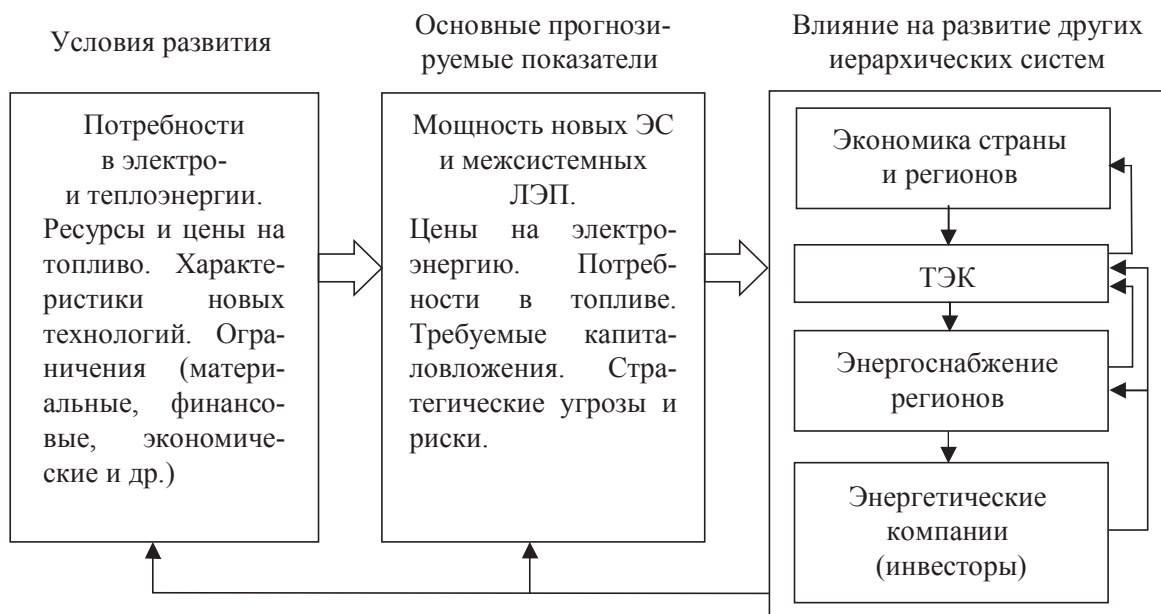


Рис. 1. Факторы и взаимосвязи, влияющие на развитие электроэнергетики и эффективность электростанций

комплексов, но возникло противоречие с принципом соответствия используемого методического инструментария неопределенности исходных данных [6]. Этому принципу отвечает поэтапный подход к сужению области неопределенности условий и результатов прогнозных исследований ТЭК [7].

На каждом временном этапе используются разные экономико-математические модели с разной степенью их агрегирования. На начальном этапе рассматривается максимальный горизонт прогнозирования (более 20–25 лет) и используется минимальное количество моделей. Процесс прогнозирования от отдаленного к близкому будущему не исключает последующей обратной итерации прогнозных исследований – корректировки долгосрочных прогнозов по результатам углубленного анализа не столь отдаленной перспективы. На каждом из этих временных этапов итеративные расчеты («сверху вниз» и «снизу вверх») позволяют учесть возможности и требования систем разного иерархического уровня, формирующих общеэнергетическую систему страны. При этом следует учитывать разные подходы к оценке эффективности проектов и вариантов ввода мощностей на разных уровнях принятия стратегических решений.

С ростом сроков прогнозирования значительно увеличивается неопределенность будущего, но снижаются требования к качеству (точности) численных значений прогнозируемых показателей. Поэтому на разных временных этапах и иерархических уровнях прогнозных исследований должны использоваться разные подходы к определению сравнительной эффективности новых электростанций, к оценке и учету инвестиционных рисков и к степени обобщения (агрегирования) получаемых результатов.

УЧЕТ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РИСКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

При принятии инвестиционных решений ориентируются на оценки чистого дисконтированного дохода, внутренней нормы доходности, срока окупаемости и других показателей, характеризующих коммерческую (финансовую) эффективность проектов.

О сравнительной эффективности проектов электростанций можно судить по величине ожидаемой стоимости генерации. В зарубежной практике для ее оценки на электростанциях различного типа используется метод расчета приведенной средней стоимости [8],

основанный на принципе вычисления приведенных средних издержек (инвестиционных и эксплуатационных затрат) за жизненный цикл электростанции с применением метода дисконтированного денежного потока.

Используемые при определении численных значений показателей эффективности проектов и приведенной стоимости генерации коэффициенты (нормы) дисконтирования включают две основные составляющие: безрисковую (гарантированный доход на капитал) и рисковую (премию за риск). Значение первой в основном ориентируется на ставку рефинансирования Центрального банка РФ и в нынешних условиях составляет (за вычетом инфляции) 6–8%.

В странах ЕС значение безрисковой ставки дисконтирования находится в диапазоне 1–7% [9]. Энергетическое информационное агентство США при оценке инвестиционных проектов электроэнергетических компаний принимает норму дисконта 10% при его рискованной составляющей – 7%.

Международное энергетическое агентство при анализе стоимости генерации на разных электростанциях в странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) [8] использовало три значения нормы дисконта: 3%, 7%, 10%. Минимальная рассматривалась как безрисковое и характеризующее социальную стоимость капитала, максимальная – предполагает инвестирование в нестабильных условиях с высоким риском.

Влияние дисконта на коммерческую эффективность и на стоимость генерации различаются для электростанций разного типа.

По расчетам [10] при изменении нормы дисконта на один процентный пункт стоимость генерации изменяется: на ПГУ – на 2.1–2.6%, на угольных ТЭС – на 3.5–4%, на АЭС – на 4.5–5%, на ГЭС – на 5.5–6%.

О существенности влияния нормы дисконта на конкурентоспособность электростанций свидетельствуют и исследования Международного энергетического агентства [8]. При норме 3% приведенная стоимость генерации на АЭС самая низкая во всех рассмотренных странах ОЭСР. При 7% средняя стоимость на АЭС, ПГУ и угольных станциях примерно одинаковая, при 10% она на 15–18% выше, чем на угольных станциях и на 10–12%, чем на ПГУ. Приведенная стоимость генерации на солнечных электростанциях (фотоэлементы) и на ветровых станциях при увеличении нормы дисконта с 4 до 10% растет на ~ 35–45% из-за очень высокой доли инвестиционной составляющей.

Крупные энергетические компании не могут ограничиваться риск-анализом отдельных проектов. При управлении развитием компании оценки опасности снижения ее рыночной стоимости, рейтингов и угрозы банкротства важнее оценки прибыльности отдельных проектов. В практике зарубежных электроэнергетических компаний для учета инвестиционных рисков применяется метод анализа, основанный на теории инвестиционных портфелей (Mean Variance Portfolio). Это метод оценки ожидаемой прибыли и риска не отдельных проектов, а совокупности строительства разных объектов (разных электростанций) при возможных изменениях спроса, производства и цен на рассматриваемом рынке. Двухэтапный подход к выбору рационального портфеля (структуры) генерирующих мощностей для обеспечения заданной перспективной потребности в электроэнергии (с учетом ценовой эластичности спроса) и графика нагрузки в условиях неопределенности описан в [11].

При выборе проектов электростанций следует учитывать их общественную эффективность – последствия осуществления данного проекта в других секторах экономики, в социальной и экологических сферах. Но удовлетворительных методов количественной оценки такого эффекта при проектировании нет.

Международная и отечественная теория и практика оценки эффективности инвестиционных проектов обобщена в [12]. В этой работе отмечается, что зарубежные методические разработки и рекомендации не учитывают особенности существующей в России нестационарной переходной экономики. В числе этих особенностей – высокие риски.

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ОБЩЕСТВЕННОЙ (СИСТЕМНОЙ) ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА РАЗНЫХ ВРЕМЕННЫХ ЭТАПАХ ПРОГНОЗНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Комплексная оценка общественной эффективности новых электростанций и их рациональной структуры возможны только на основе многовариантного и многокритериального анализа с учетом: вероятной динамики спроса на электроэнергию, будущих условий в разных регионах, ограничений на ввод мощностей топливоснабжения электростанций, экологических требований и других факторов. Такую возможность дает использование оптимизационных моделей электроэнергетики во взаимодействии с моделями ТЭК и региональных систем энергоснабжения.

В любой системе моделей, используемой при прогнозировании развития энергетики, основными являются оптимизационные модели ТЭК страны. Они позволяют в первом приближении выделить варианты ввода мощностей в электроэнергетике и в топливной промышленности для обеспечения заданной потребности в энергоносителях и выбранного критерия. Дополнительная оценка и корректировка этих вариантов может потребовать использования специализированных оптимизационных моделей отраслевых систем ТЭК, учитывающих режимы производства и потребления электроэнергии, региональные особенности и другие факторы [13,14].

Анализ показывает, что взаимосвязи моделей разного иерархического уровня и итерационные расчеты особенно важны при среднесрочных прогнозах. При горизонте прогнозирования до 10–15 лет целесообразно дополнительно включать в схему прогнозных исследований уровень энергетических компаний, моделируя (имитируя) возможную реакцию инвесторов на вероятную динамику цен и спроса.

В указанных моделях оптимальное решение определяется по критерию минимума дисконтированных затрат при заданных условиях и ограничениях. Принимаемое при этом значение коэффициента дисконтирования может оказать значительное влияние на рациональную структуру электростанций (табл. 2).

При оптимизации развития электроэнергетики и ТЭК определяется общественная эффективность вариантов, а инвестиционные риски в основном учитываются в задаваемых ограничениях на ввод новых мощностей. Поэтому в оптимизационных расчетах величина нормы дисконта должна быть меньше, чем при оценке коммерческой эффективности проектов.

Таблица 2

**Влияние изменения коэффициента дисконтирования на структуру ввода новых электростанций
(в процентах от суммарной мощности)**

Тип станции	Норма дисконта			
	7%	10%	15%	20%
Газовые: КЭС	23	33	43	43
ТЭЦ	19	18	18	18
Угольные: КЭС	29	26	30	32
ТЭЦ	10	9	8	7
АЭС	11	10	0.5	0
ГЭС	5	3	0.5	0
ВИЭ	3	1	0	0

Примечание. Результаты оптимизационных расчетов для одного из сценариев развития электроэнергетики в Европейской части РФ в период 2020–2025 гг. с учетом возможных ресурсных и ценовых ограничений на газ.

При поэтапном подходе к долгосрочному прогнозированию ТЭК и включению в итерационную схему расчетов региональных моделей энергоснабжения и моделей, имитирующих поведение потенциальных инвесторов – энергетических компаний, целесообразно учитывать сравнительную рискованность рассматриваемых вариантов. Такую возможность дает использование стохастических моделей. Основные параметры в этих моделях определены не однозначно, а через законы распределения их вероятности.

Стохастические модели целесообразно использовать на заключительных этапах прогнозирования – при решении самых значимых для каждого временного этапа задач (табл. 3). К таким задачам относятся: количественная оценка стратегических угроз и пороговых значений индикаторов энергетической безопасности, прогноз взаимосвязанной динамики цен и спроса на региональных энергетических рынках, оценка конкурентоспособности новых электростанций и технологий, принципиальных изменений в структуре производства и потребления электроэнергии и топлива. При решении этих задач важно учитывать региональные особенности (экономические, энергетические, природные и др.).

Взаимозависимость сравнительной эффективности новых электростанций, спроса и цен на электроэнергию делает возможным и целесообразным определение рационального ввода мощностей и стоимости производства на них электроэнергии в единой оптимизационной модели энергоснабжения региона. С ее помощью должна решаться задача приближенной оценки конкурентоспособности разных электростанций, разных способов рационального обеспечения заданной потребности в электроэнергии с учетом неоднозначности ожидаемых условий и инвестиционных рисков.

Такая модель и компьютерная программа МИСС-ЭЛ (Модель Имитационная Стохастическая Статическая) разработана в ИСЭМ СО РАН [15]. Критерий оптимальности в этой модели – минимум цены на генерацию электроэнергии на рассматриваемой территории, ограничениями являются: потребности в электроэнергии, ее возможный экспорт или импорт, мощность существующих станций и потенциально возможный ввод электростанций разного типа, ограничения на поставку в регион газа. Эти ограничения

Таблица 3

Область целесообразного использования детерминированных стохастических моделей при прогнозных исследованиях развития ТЭК и электроэнергетики

Типы моделей	Горизонт прогнозирования	Решаемые задачи
<p>Детерминированные Основные: оптимизационные ТЭК и электроэнергетики Дополнительные: зарегистрированные модели: отраслевых систем ТЭК, макроэкономики, потребностей в энергоносителях и динамики их стоимости</p>	<p>Более 20–25 лет До 15–20 лет</p>	<p>Определение границ прогнозной области (конуса) неопределенности, устойчивых решений (инвариантов). Анализ новых тенденций и направлений НТП. Рациональная структура новых мощностей в электроэнергетике и в топливной промышленности (при разных сценариях). Выявление возможных барьеров и проблем, и путей их преодоления.</p>
<p>Стохастические Энерго- и топливоснабжения регионов, региональных энергетических рынков, развития энергетических компаний</p>	<p>До 10–15 лет</p>	<p>Перспективы развития региональных энергосистем и новых электростанций. Риск-анализ крупномасштабных проектов и программ. Количественная оценка стратегических угроз и пороговых значений индикаторов энергетической безопасности. Ценовая эластичность спроса на топливо и электроэнергию.</p>

задаются интервально. Верхняя и нижняя границы принимаются для цен на топливо, удельных капиталовложений и технико-экономических показателей, влияющих на себестоимость электроэнергии. Рассматриваемые в модели крупные регионы представлены несколькими подрегионами, что позволяет учесть особенности условий их энерго- и топливоснабжения и межрегиональные энергетические связи. Искомыми переменными в модели являются: мощности новых электростанций, выработка электроэнергии на них, объемы потребления разных видов топлива, цены производителя на каждой станции, средневзвешенная и маргинальная (предельная) цены генерации в регионе.

Для учета неопределенности приходится получать и рассматривать множество (сотни) оптимальных решений для разной комбинации исходных данных. Это предполагает использование в компьютерной программе модели МИСС-ЭЛ метода статистических испытаний (метод Монте-Карло). Программа дает возможность выбирать характер распределения случайных величин в задаваемом диапазоне. Он может быть равномерным, нормальным, логнормальным, показательным и т.д.

Многовариантные расчеты МИСС-ЭЛ позволяют определять не только наиболее эффективный состав и мощность вводимых электростанций по заданному критерию для каждой комбинации возможных условий, но и инвестиционные риски сооружения каждой станции. Для этого компьютерная программа включает определение частоты (вероятность) попадания данной станции в оптимальные решения. Чем меньше эта вероятность, тем выше риск реализации соответствующего инвестиционного проекта.

Из множества рассчитанных вариантов сбалансированного ввода мощностей программа МИСС-ЭЛ формирует основной, включающий наименее рискованный состав электростанций и обеспечивающий минимальную цену генерации в рассматриваемых условиях.

Очевидно, что состав и свойства используемых моделей, степень их агрегирования зависят от рассматриваемой перспективы и от решаемой с их помощью на каждом этапе задачи.

При определении рациональной структуры электростанций и при решении других задач прогнозирования с использованием оптимизационных моделей возможна разная степень агрегирования учитываемых объектов, территории и связей.

Методы итеративного агрегирования информации в иерархически построенных системах моделей разрабатывались в 70–80-е годы прошлого столетия и применялись для согласования решений в отраслевой и региональной иерархии моделей общеэнергетических систем. Эти методы предполагают агрегирование и разагрегирование всех взаимосвязанных моделей на каждой итерации. При этом окончание всех расчетов, достижение приемлемой степени агрегирования определяется по совпадению критерия оптимальности модели верхнего уровня на двух последовательных итерациях. При среднесрочном прогнозировании такой моделью может быть динамическая модель макроэкономики (с критерием – максимум ВВП или конечного потребления товаров и услуг), при долгосрочных прогнозах – агрегированная модель ТЭК страны (с критерием минимума затрат на производство и транспорт энергоносителей).

Традиционно проблема агрегирования трактуется как проблема сокращения размерности модели таким образом, чтобы потери информации, получаемой с ее помощью, были минимальными. Представляется, что при большой неопределенности исходных данных, больших размерах и сложности прогнозных моделей целесообразно ставить проблему определения рационального агрегирования таких моделей. При этом надо учитывать величину и характер неопределенности исходных данных.

Значение такого учета демонстрируют результаты экспериментальных расчетов модели МИСС-ЭЛ [16]. Рассматривались два макрорегиона: Европейская часть страны и часть Сибири, охватываемая объединенной электроэнергетической системой. В каждом из этих макрорегионов в базовом варианте выделялись по шесть регионов, отличающихся спросом на электроэнергию и условиями топливоснабжения электростанций. При оценке влияния на результаты расчетов агрегирования территории и электростанций в каждой из моделей электроснабжения Европейской части и Сибири шесть регионов объединялись

Отклонение результатов расчетов агрегированных моделей от эталонных

Характеристика исходных данных	Стоимость генерации		Доля ПГУ	
	%	ПП	%	ПП
Средние значения	1	0.5	6	9
Нормальное распределение	2.1	0.1	12	10
Интервальная неопределенность	2.4	0.2	18	12

Примечание. Результаты расчетов для условий 2020–2025 гг. Отклонение цен дано в процентах, а изменения в структуре (доле ПГУ в суммарном вводе электростанций) в процентных пунктах (пп).

в один. Вместо локальных принимались обобщенные интервалы неопределенности цен на топливо и суммарные ограничения на максимально допустимый ввод мощностей газовых, атомных и гидроэлектростанций.

Из результатов расчетов (табл. 4) следует, что агрегирование мало сказывается на средней стоимости генерации (особенно в Сибири), но оказывает заметное влияние на структуру ввода электростанций. Погрешность, вызываемая агрегированием, увеличивается, если в МИСС-ЭЛ исходные данные задаются не их средними значениями в заданном диапазоне, а нормальным распределением или полной (интервальной) неопределенностью внутри этого диапазона.

Рациональное агрегирование моделей, используемых в практике прогнозирования, предполагает оценку и учет влияния неопределенности исходных данных на вероятную погрешность основных прогнозируемых показателей. Оно требует представления о приемлемой ошибке прогноза для принятия своевременных решений (инвестиционных, управленческих, стратегических).

Очевидно, что важность и сложность учета всех этих факторов определяется горизонтом прогнозирования и особенностями решаемой задачи. Чем шире интервал неопределенности исходных данных (растущий с увеличением горизонта прогнозирования), тем выше неизбежная погрешность результатов прогноза и, соответственно, больше основания для использования более агрегированных моделей.

ВЫВОДЫ

Эффективность и конкурентоспособность новых электростанций оцениваются при рассмотрении отдельных инвестиционных проектов и при определении рациональной структуры генерирующих мощностей в среднесрочной и долгосрочной перспективе. В первом случае используются в основном показатели коммерческой эффективности, во втором применяется многокритериальный подход с оценкой общественной эффективности не отдельных станций, а варианта развития электроэнергетики, той или иной структуры электростанций.

При комплексной оценке и выборе рационального состава новых генерирующих мощностей следует учитывать: тенденции изменений технологий; динамику цен и спроса на электроэнергию и топливо; изменяющиеся во времени требования и ограничения; возможные последствия принятия тех или иных стратегических решений для экономики, социальной сферы и экологии. Такой учет возможен при использовании системы оптимизационных моделей.

Растущая с увеличением сроков прогнозирования неопределенность условий развития электроэнергетики увеличивает значение учета инвестиционных рисков при оценке экономической эффективности проектов электростанций и вариантов ввода новых мощностей. Оценка инвестиционных рисков отдельных крупномасштабных проектов,

исключение их из состава рассматриваемых в случае неприемлемого риска, позволяет вносить соответствующие коррективы в исходные данные и в ограничения оптимизационных моделей.

В зависимости от рассматриваемой перспективы и целей прогнозах исследований состав моделей, способы их взаимодействия, степень агрегирования территории и электростанций должны быть разными.

При среднесрочных (до 10–15 лет) прогнозах развития электроэнергетики и ТЭК в состав используемых моделей следует включать стохастические модели региональных систем энергоснабжения, которые позволяют оценивать инвестиционные риски и определять рациональный вариант ввода мощностей с учетом неопределенности исходных данных.

Экспериментальные расчеты показали возможное влияние на рациональную структуру электростанций: характера неопределенности используемой информации, принимаемых в расчетах значений коэффициентов дисконтирования, степени агрегирования моделей.

Следует отметить, что ожидаемое значительное развитие интеллектуальных систем и распределенной генерации может повлиять на моделирование многоуровневых энергетических систем различного масштаба, на состав учитываемых в прогнозах факторов и на способы комплексной оценки эффективности электростанций и их рациональной структуры.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания III.17.5.2, рег. № АААА-А17-117030310452-7 и отражает результаты исследований, выполняемых по гранту Российского Фундаментального Фонда Исследований, проект № 16-06-00091-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Energy Perspective. Cost of Energy Technologies / World Energy Council. Paris. 2013. 42 p.
2. Energy Technology Perspectives 2015. Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action / International Energy Agency. Paris. 409 p.
3. Levelised Cost and Levelised Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook, 2016. Режим доступа: <http://www.eia.gov/forecast/aeo>
4. Воронай Н.И., Иванова Е.Ю. Многокритериальный анализ решений при планировании развития электроэнергетических систем // Электричество. 2000. № 11. С. 2–9.
5. Afgan N.H., Corvolha M.G. Multi-Criteria Assessment of New and Renewable Energy Power Plants // Energy. 2002. V. 27. № 4. P. 739–755.
6. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике: Элементы теории, направления развития. М.: Наука. 1979. 414 с.
7. Кононов Ю.Д. Поэтапный подход к повышению обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК и к оценке стратегических угроз // Изв. РАН. Энергетика. 2014. № 2. С. 61–70.
8. Projected Cost of Generating Electricity. 2015 Edition / International Energy Agency, Nuclear Energy Agency. Paris, 2015. 210 p.
9. World Energy Outlook 2016 / International Energy Agency. Paris, 2016. 668 p.
10. Кононов Д.Ю. Учет региональных особенностей и характера неопределенности при прогнозировании цен на производство электроэнергии // Электрические станции. 2015. № 5. С. 2–5.
11. Vithayasrichareon P. A Monte-Carlo based decision-support tool for assessing generation portfolios in future carbon constrained electricity industries // Energy Policy. 2012. V. 41. P. 374–392.

12. *Виленский П.Л., Ливищ В.Н., Смоляк С.А.* Оценки эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика. М.: Поли Принт Сервис, 2015. 1300 с.
13. *Макаров А.А., Волкова Е.А., Веселов Ф.В.* и др. Перспектива развития электрогенерирующих мощностей России // Теплоэнергетика. 2008. № 2. С. 4–16.
14. Обоснование развития электроэнергетических систем: методология, модели, методы, их использование / Отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск, Наука. 2015. 448 с.
15. *Кононов Ю.Д., Тыртышный В.Н.* Оценка влияния неопределенности исходных данных на эффективность вариантов энерго- и топливоснабжения регионов в прогнозных исследованиях // Проблемы прогнозирования. 2013. № 1. С. 90–94.
16. *Кононов Д.Ю., Кононов Ю.Д.* Рациональное агрегирование территории при долгосрочном прогнозировании цен на электроэнергию // Проблемы прогнозирования. 2016. № 6. С. 56–64.

УДК 622.691.4:622.692.4:62-192

НОВЫЕ МЕТОДЫ РЕЖИМНОЙ ДИАГНОСТИКИ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

© 2018 г. М.Г. СУХАРЕВ, К.О. КОСОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», Москва, Россия

E-mail: mgsukharev@mail.ru, kseniya_kosova@mail.ru

Рассмотрены задачи обнаружения утечек флюида и поверки измерительных приборов в системах магистрального трубопроводного транспорта. На примере трубопроводных систем транспорта газа и нефтепродуктов для решения задач предложены новые методы режимной диагностики. В качестве исходных данных используются замеры штатных измерительных устройств. Процедура обнаружения момента разгерметизации трубопровода основана на применении непараметрических методов скорейшего обнаружения разладки случайного процесса. Метод поверки измерительных приборов базируется на алгоритмах параметрической идентификации. Эффективность методов проверена численными расчетами путем обработки реальных телеметрических измерений.

Ключевые слова: надежность трубопроводных систем, режимная диагностика, утечки, поверка измерительных приборов, задача о разладке, идентификация параметров.

NEW DIAGNOSTIC METHODS FOR PIPELINE SYSTEM RELIABILITY AND SAFETY INCREASING ACCORDING TO FLOW PARAMETERS

M.G. SUKHAREV, K.O. KOSOVA

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)», Moscow, Russian Federation

E-mail: mgsukharev@mail.ru, kseniya_kosova@mail.ru

The paper considers the problems of detection of fluid leaks and calibration of measuring devices in main pipeline systems. On the example of the gas and oil products transport systems we propose new regime diagnostics methods for solving these problems. The methods are based on the processing of measurements of standard measuring devices. The procedure of detection of fluid leaks uses nonparametric change-point methods. The calibration method is based on the parametric identification methods. The efficiency of the methods is verified by numerical calculations by processing real telemetry data.

Keywords: reliability of pipeline transport, regime diagnostics, leaks, verification of measuring instruments, change-point problem, parameter identification.

ВВЕДЕНИЕ

Системы трубопроводного транспорта газа, нефти и нефтепродуктов выполняют важную роль в энергетике и экономике России, поэтому информационная база для мониторинга состояния этих систем постоянно совершенствуется.

Оснащение магистрального транспорта контрольно-измерительными приборами и системами телеметрии позволяют собирать и обрабатывать большие объемы информации о параметрах потока флюида (давлении, расходе, температуре и т.д.). Это должно приводить к повышению эффективности, безопасности и надежности функционирования трубопроводных систем (ТС). Некоторые данные, получаемые со штатных измерительных приборов, анализируются специализированными программными комплексами, что способствует более обоснованному принятию оперативных решений. Но растущий информационный потенциал ТС фактически используется не в полной мере.

Детализированные данные о режимах течения флюида позволяют развивать существующие и разрабатывать новые методы повышения надежности и безопасности ТС магистрального транспорта. Следует отметить, что методы режимной диагностики мало затратны и должны быть привлекательны для эксплуатирующих организаций.

Остановимся на двух вопросах повышения надежности и безопасности функционирования газо-, нефте- и продуктопроводных систем, для решения которых можно развивать методы режимной диагностики. Первый из них связан с обнаружением утечек и незаконных врезок в нефте- и продуктопроводы, второй – с проверкой совокупности измерительных приборов, установленных на объектах газотранспортной системы (ГТС). Несмотря на то, что каждая из этих задач относится к конкретной технологической области, подходы, используемые для их решения, могут быть использованы применительно к другим ТС.

Обнаружение утечек и незаконных врезок

Оперативное обнаружение утечек и незаконных врезок в трубопроводы является одной из приоритетных задач обеспечения безопасности эксплуатации нефте- и продуктопроводов. Утечки [1] и незаконные врезки [2,3] приводят к серьезным экологическим проблемам, наносят экономический и репутационный ущерб предприятиям-операторам.

Скорейшее установление факта и места образования утечки вызывает повышенный интерес исследователей [4]. Однако, несмотря на многообразие разработанных способов, задачу обнаружения утечек и незаконных врезок нельзя считать решенной.

Современное информационное оснащение нефте- и продуктопроводных систем позволяет подойти к задаче обнаружения утечек и незаконных врезок, используя аппарат математической статистики и теории случайных процессов (временных рядов).

Разгерметизация трубопровода сопровождается падением давления, волна распространяется вдоль трубы, и утечка может быть обнаружена по изменению параметров течения флюида, фиксируемых штатными приборами. Похожие процессы могут иметь место, однако, при остановке насосного агрегата, открытии/закрытии линейного крана и т.д. Поэтому сложность распознавания утечек по телеметрическим данным обусловлена необходимостью отличать падение давления, вызванное возникновением утечки, от других технологических причин.

Математическая постановка задачи и метод решения

Для идентификации момента возникновения утечки рассмотрим последовательность замеров давления $P(t)$ в моменты времени $t(t = 1, 2, \dots)$ ¹. Последовательность $P(t)$ представляет собой случайный процесс с дискретным временем – временной ряд. В общем

¹ Можно рассматривать несколько временных рядов – замеров давления вблизи места утечки, но это в настоящей работе не сделано.

случае процесс $P(t)$ является нестационарным, что обуславливается технологическими причинами. В случайный момент времени T происходит резкое падение давления, вызванное утечкой, вероятностные характеристики случайного процесса $P(t)$ меняются. Необходимо скорее определить момент времени, когда произошло это изменение.

В статистике случайных процессов резкое изменение вероятностных свойств называется *разладкой*, момент времени T – *моментом разладки* [5]. Для скорейшего обнаружения момента разладки разработаны методы последовательного анализа [5,6]. Априорная информация о распределении момента T и распределении наблюдаемой последовательности $P(t)$ после момента разладки отсутствует, поэтому для идентификации утечки на трубопроводе целесообразно использовать непараметрические методы последовательного анализа [5,6].

Идея этих методов заключается в том, что по последовательности наблюдений $\xi(t)$ строится статистика $y(t) = y_t$, по ней находится значение бинарной решающей функции $d(y_t)$. Если $d(y_t) = 1$, то в момент времени t произошла разладка, если $d(y_t) = 0$, то разладки не было.

В непараметрических методах обнаружения разладки делается предположение о стационарности наблюдаемой последовательности $\xi(t)$. По технологическим причинам процесс $P(t)$ при распознавании утечек нефти и нефтепродуктов является нестационарным, поэтому перед применением методов последовательного анализа необходимо привести процесс $P(t)$ к стационарному виду $\xi(t)$. Для этого при поступлении нового замера $P(t+1)$ рассмотрим предысторию процесса $P(t)$ в моменты времени $t-n, t-n+1, \dots, t$ ($n \geq 0$), когда разладка не была обнаружена. По наблюдениям $P(t-n), P(t-n+1), \dots, P(t)$ найдем тренд $f(t)$ [7]. Вычислив $f(t+1)$ – прогнозируемое значение процесса $P(t)$ в момент времени $t+1$ – найдем величину $\xi(t+1) = P(t+1) - f(t+1)$. Большое по модулю значение $\xi(t+1)$ свидетельствует о резком (скачкообразном) изменении давления – возникновении разладки.

Таким образом, предлагаемый метод идентификации утечек последовательно проверяет поступающие замеры давления на наличие разладки. При этом определяется прогноз процесса $f(t+1)$. Если поступающее значение $P(t+1)$ существенно отличается от прогноза, то считается, что имеет место разладка, а t – момент возникновения утечки. Отличие $P(t+1)$ от прогнозируемого значения $f(t+1)$, определяется с помощью непараметрического метода скорейшего обнаружения разладки.

Результаты расчетов – обработка фактических замеров

Рассмотрим работу предлагаемого метода на примере реального продуктопровода, на котором замеры давления $P(t)$ осуществляются с периодичностью 0,5 с. В расчетах полагалось $n = 19$, в качестве метода скорейшего обнаружения разладки использовался метод кумулятивных сумм (CUSUM) [6].

Статистика CUSUM имеет вид:

$$y_t = \min(y_{t-1} + \xi(t), 0), \quad y_0 \equiv 0, \quad t = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

решающая функция –

$$d(y_t) = I(y_t < N), \quad (2)$$

где $N < 0$ – критическое значение (параметр алгоритма); I – индикатор.

В соотношениях (1), (2) предполагается, что математические ожидания последовательности $\xi(t)$ до момента разладки m и после момента разладки $h + m$ удовлетворяют неравенствам:

$$m > 0, \quad h + m < 0. \quad (3)$$

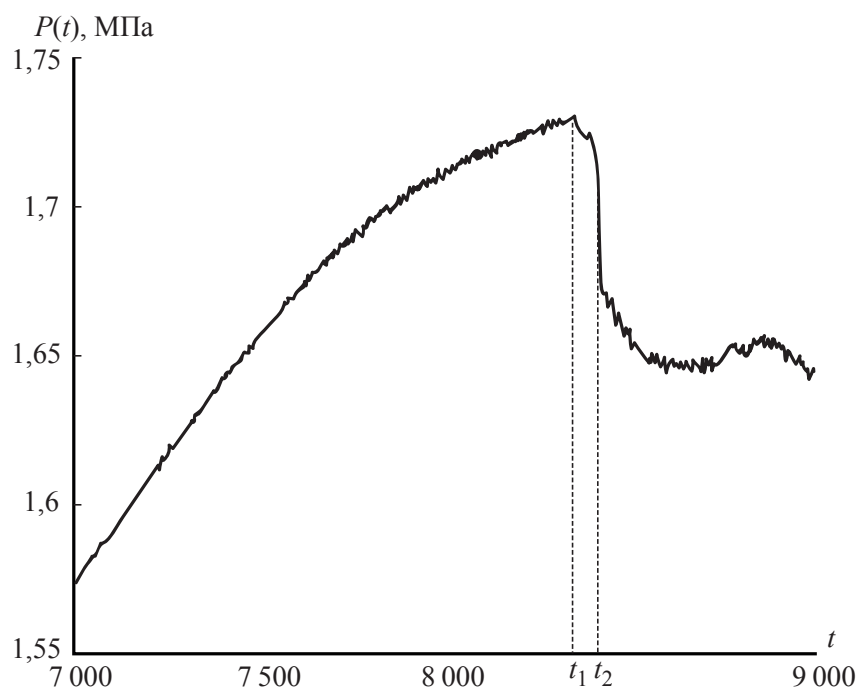


Рис. 1. Пример 1. Замеры давления $P(t)$

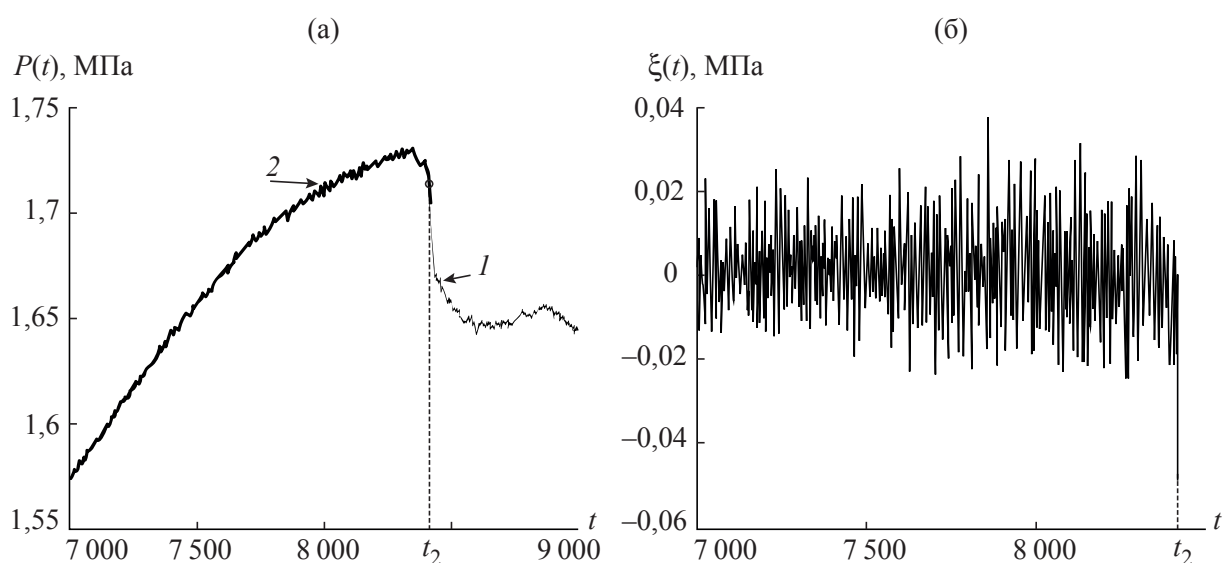


Рис. 2. Пример 1: а – графики функций $P(t)$ и $f(t)$; 1 – $P(t)$; 2 – $f(t)$; б – график функции $\xi(t)$

При выполнении условий (3) до момента разладки $y_t = 0$ и после возникновения разладки значения y_t изменяются в сторону уменьшения. Сигнал о возникновении утечки подается при достижении y_t критического значения N . Параметр N подбирается методом вычислительного эксперимента на основании обработки фактических реализаций обучающих временных рядов. В проведенных расчетах $N = -0,01$, для выполнения неравенств (3) к наблюдаемым значениям $\xi(t)$ прибавлялась величина $b = 0,025$, характеризующая максимальную погрешность измерения.

Работа алгоритма проверялась на следующих примерах.

Пример 1. На рис. 1 приведен график $P(t)$ – давления, замеренного одним из установленных на продуктопроводе датчиков. От начала наблюдения до момента времени

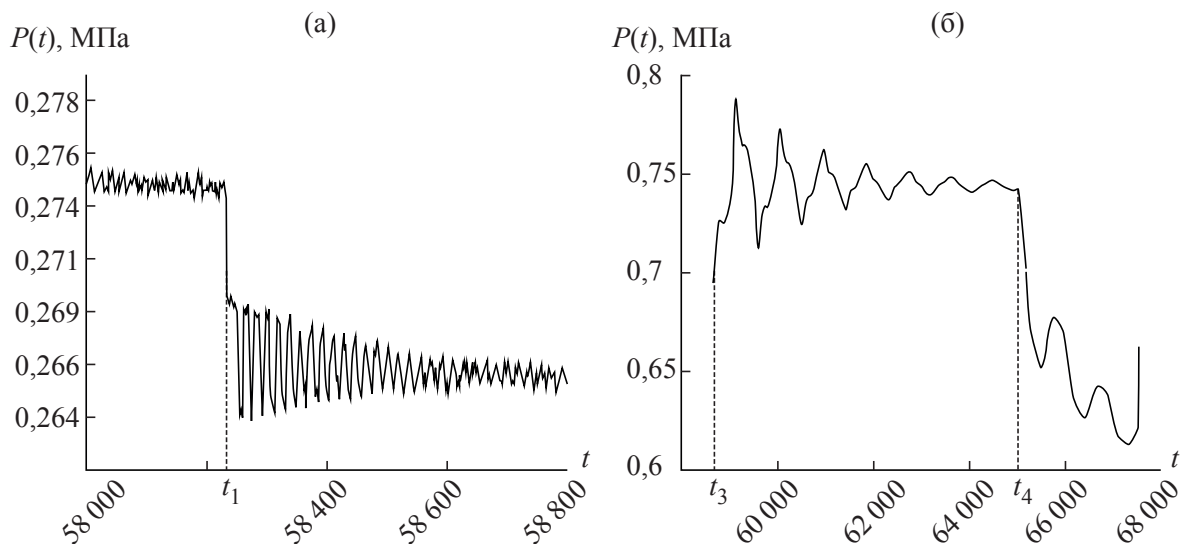


Рис. 3. Замеры давления $P(t)$: а – пример 2; б – пример 3

$t_1 = 8345 \cdot 0,5$ с происходит выход на запланированный режим работы продуктопровода. Затем возникает утечка, которая приводит к резкому падению давления.

В результате работы алгоритма утечка была обнаружена в момент времени $t_2 = 8412 \cdot 0,5$ с, т.е. спустя 33,5 с после ее возникновения. Часть графика $P(t)$ (рис. 1) в более крупном масштабе показана на рис. 2а, там же показан тренд $f(t)$, найденный в процессе работы алгоритма. Функции $f(t)$ и $P(t)$ визуально неразличимы. На рис. 2б представлен стационарный случайный процесс $\xi(t)$ при $t \geq 8000 \cdot 0,5$ с.

Пример 2. На рис. 3а приведен график волнового процесса, давления $P(t)$ с момента времени $t = 58000 \cdot 0,5$ с. Действительный момент утечки $t_1 = 58581 \cdot 0,5$ с на рис. 3а показан пунктиром. Алгоритм позволил идентифицировать момент утечки как $t_2 = 58582 \cdot 0,5$ с, то есть практически мгновенно, спустя 0,5 с после ее возникновения. На рис. 3а моменты утечки и ее распознавания визуально не различимы.

Пример 3. Эффективность работы метода проверялась также на примерах, когда утечка не происходила. На рис. 3б приведен один из таких случаев. Волновой процесс, начавшийся в момент $t_3 = 58700 \cdot 0,5 = 489,2$ мин, является следствием отключения насоса (имевшего место до момента t_3). В момент $t_4 = 65020 \cdot 0,5 = 541,8$ мин была открыта задвижка. Казалось бы, что здесь также, как и в примерах 1 и 2, должны иметь место моменты разладки. Однако программой таких моментов не обнаружено: ложных срабатываний метода не было.

Расчеты показывают, что обработку поступающих замеров по методу можно выполнять в режиме реального времени, утечка быстро обнаруживается после ее возникновения. Реакции метода на утечку и на возмущения, вызванные другими технологическими причинами, закрытием задвижки и отключением насоса, различаются. Столь позитивный результат во многом объясняется тем, что перед применением алгоритма CUSUM снимается тренд, то есть осуществляется переход от модели нестационарного случайного процесса к модели процесса стационарного. Удачный выбор параметра n (длительности предистории) позволяет адекватно спрогнозировать дальнейшее поведение процесса и предотвратить ложные срабатывания.

Дать гарантию, что метод всегда сможет отличить утечку от возмущений, вызванных другими причинами, нельзя. Но для реализации метода используются штатные измерительные приборы и не требуется оснащения системы дополнительным оборудованием, что определяет целесообразность дальнейших исследований и совершенствования предлагаемого аппарата.

Поверка измерительных приборов

Опираясь на совершенствование информационного обеспечения, предлагаем ещё один способ повышения безопасности и надежности функционирования ТС. Основным источником информации о режимах течения флюида являются установленные на ТС измерительные приборы. Обеспечение качества измерений оказывается необходимым условием надежного и безопасного функционирования оборудования и ТС в целом. Ошибки в исходных данных снижают достоверность расчетов и могут привести к принятию неверных управленческих решений.

Повышению достоверности собираемой информации служат периодические поверки и калибровки измерительных приборов. Эти процедуры – неотъемлемая часть технического обслуживания ТС. Их методическая основа разработана, регламенты проведения утверждены и за десятилетия мало изменялись. Качественные сдвиги в области информатизации ТС позволяют предложить новые способы поверки и калибровки приборов, отвечающие современному уровню развития техники и технологий. Далее описывается один из способов, предназначенный для корректировки показаний датчиков давления в процессе эксплуатации ГТС. Эффект достигается за счет обработки взаимосвязанных измерений несколькими приборами. Применительно к электроэнергетическим системам похожий подход получил развитие, в частности, в работах [8, 9].

Продemonстрируем идейную сторону предлагаемой методики на примере технического коридора магистральных газопроводов (рис. 4). Внешние диаметры труб равны 1420 мм (нитка I) и 1220 мм (нитка II). Длина трассы 176,9 км. Пунктов замера 9, индекс

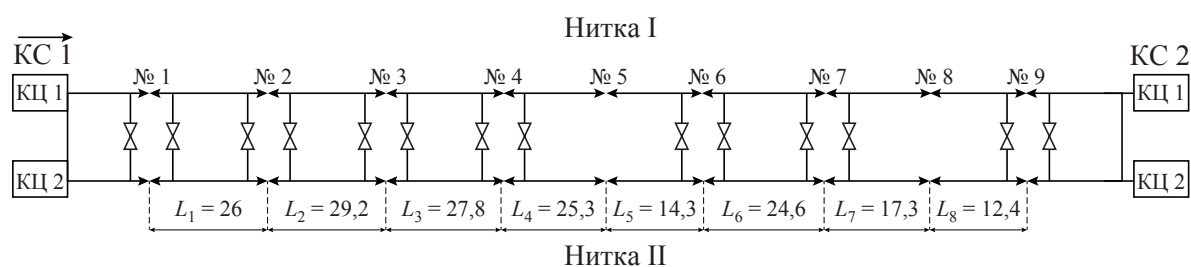


Рис. 4. Принципиальная схема ГТС. Длины секций L_i ($i = 1, \dots, 8$), км. Белые перемычки закрыты, черные открыты

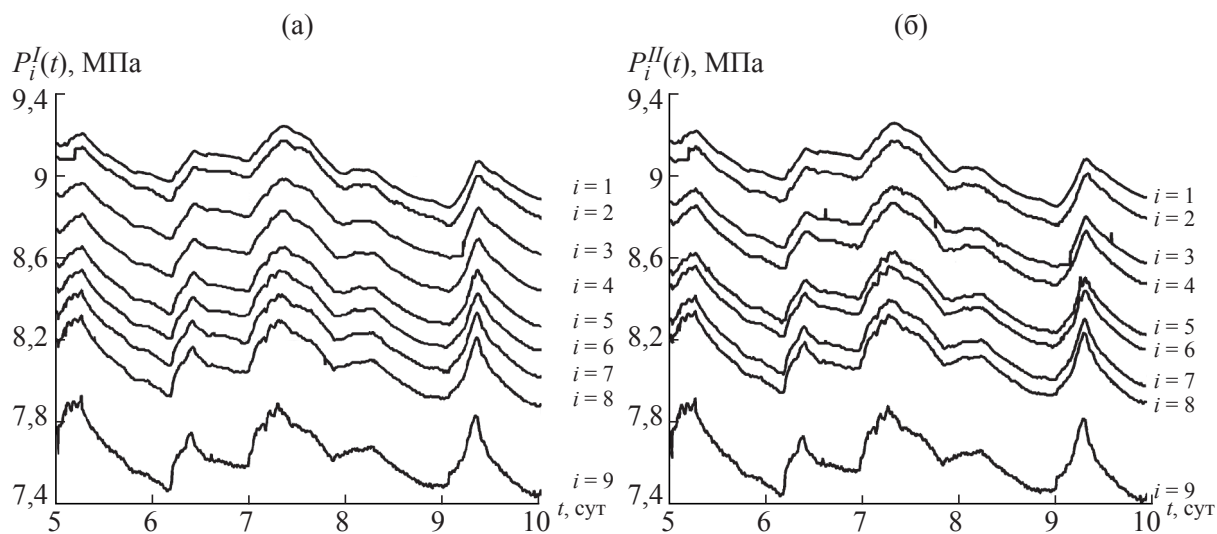


Рис. 5. Замеры давления по ниткам: а – функций $P_i^I(t)$, $i = 1, \dots, 9$; б – функций $P_i^{II}(t)$, $i = 1, \dots, 9$

i используется для их нумерации $i = 1, 2, \dots, 9$. Пунктами замера участок разбивается на восемь трубопроводных секций. Каждой секции присваивается номер начального (по направлению течения) пункта $i = 1, 2, \dots, 8$. Нитки работают изолированно, открыты лишь переключки в начале и конце участка, все переключки по трассе закрыты.

Обрабатывались замеры давления, температуры и расхода на интервале наблюдения, равном 10 сут. Манометры и термометры расположены у каждой переключки. Расход измеряется в конце участка, на входе компрессорной станции (КС) 2. На рис. 5 приведены графики замеров давления при $t \geq 5$ сут: на рис. 5а — по нитке I, на рис. 5б — по нитке II. Выяснилось, что температура оказывает на результаты расчета существенно меньшее влияние, чем давление, поэтому сведения о температурном режиме опускаются.

Математическая модель

Для описания взаимозависимости между параметрами газового потока будем пользоваться моделью стационарного квазиизотермического течения. Рассматриваемый участок горизонтальный, поэтому модель имеет вид [10, 11]:

$$P_s^2 - P_f^2 = \Lambda D^{-5} L E^{-2} q^2, \quad (4)$$

где P_s, P_f — значения давления в начале и конце участка; Λ — коэффициент, зависящий от характеристик трубы, свойств газа, принятых единиц измерения; D — внутренний диаметр; L — длина трубопровода; E — коэффициент гидравлической эффективности (используется для адаптации результатов расчетов к фактическим режимам эксплуатации); q — коммерческий расход газа. Температура рассчитывается в соответствии с формулой Шухова [10, 11].

Формула (4) применима не только к участку в целом, но и к каждой секции. Для любого $i = 1, 2, \dots, 8$ можно записать

$$P_i^2 - P_{i+1}^2 = \Lambda_i D_i^{-5} L_i E_i^{-2} q_i^2. \quad (5)$$

Следует отметить, что величины D_i и q_i зависят от номера нитки, при этом для всех участков одной нитки они равны: $q_1 = \dots = q_8 = q$, $D_1 = \dots = D_8 = D$. Отличиями Λ_i можно пренебречь. Кроме того, нет оснований считать коэффициенты гидравлической эффективности E_i различными. Предполагая, что $E_1 = \dots = E_8$, получаем, что величины $P_i^2 - P_{i+1}^2$ различаются, главным образом, из-за длин секций.

Систематические ошибки замеров давления

Рассмотрим, какие выводы позволяет сделать анализ функций $P_i^I(t), P_i^{II}(t), i = 1, \dots, 9$ (рис. 5). В соответствии с (5) значение $P_i^2 - P_{i+1}^2$ пропорционально длине секции L_i , и с ростом L_i должно увеличиваться “расстояние” между функциями $P_i(t)$ и $P_{i+1}(t)$ на рис. 5а, 5б. Из рис. 5 видно, что это условие не выполняется. Например, “расстояние” между функциями $P_8(t)$ и $P_9(t)$ больше других “расстояний” между смежными графиками $P_i(t)$ и $P_{i+1}(t)$, несмотря на то, что длина секции 8 минимальна $L_8 = 12,4$. С чем связано это несоответствие?

Физических оснований для объяснения этого эффекта авторы не нашли. В период наблюдения не было зафиксировано гидратных пробок, отложений конденсата или шлама. Срок службы трубопровода невелик, расходы газа большие, газ хорошо подготовлен к транспорту по магистралям. В таких условиях эксплуатации местные сопротивления не образуются. В случае же их появления технические службы заметили бы отклонение от нормы и приняли меры по его устранению.

Единственно приемлемым объяснением наблюдаемого эффекта является наличие систематических приборных ошибок при измерении давления. Обозначим через ΔP_i систематическую ошибку, результат измерения — $P_i^* = P_i + \Delta P_i$. Рис. 5а, 5б показывают, что наиболее правдоподобными гипотезами о наличии систематических ошибок будут следующие: для нитки I $\Delta P_6^I \neq 0$ и $\Delta P_7^I \neq 0$, для нитки II — $\Delta P_2^{II} \neq 0$, $\Delta P_3^{II} \neq 0$, $\Delta P_4^{II} \neq 0$,

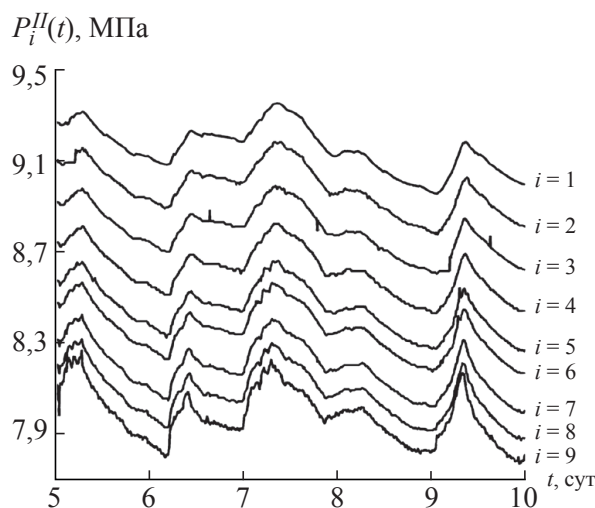


Рис. 6. Графики функций $P_i^{II}(t)$, $i = 1, \dots, 9$ после устранения систематических ошибок

Таблица 1

Оценки систематических ошибок замеров давления

E_i^I, E_i^{II}	ΔP_1 , МПа	ΔP_2^{II} , МПа	ΔP_3^{II} , МПа	ΔP_4^{II} , МПа	ΔP_5^{II} , МПа	ΔP_6^I , МПа	ΔP_7^I , МПа	ΔP_8^{II} , МПа	$\Delta P_9, z$ МПа
0.9929	-0.1032	-0.0171	-0.0439	0.0427	-0.0291	-0.0262	0.0283	0.0329	-0.3334

$\Delta P_5^{II} \neq 0$, $\Delta P_8^{II} \neq 0$. Кроме того, целесообразно оценить систематические ошибки ΔP_1 и ΔP_9 (общие для обеих ниток).

Поиск искомых оценок будет проведен на основе алгоритма параметрической идентификации систем газоснабжения [12–13], для этого в модель идентификации параметров, кроме систематических ошибок, введем коэффициенты гидравлической эффективности E_i^I, E_i^{II} , $i = 1, \dots, 8$ (которые целесообразно считать равными). Процедура идентификации дает искомые оценки (таблица 1). Результаты расчета показывают, что абсолютные значения систематических ошибок являются существенными. Поправка на величину систематических ошибок делает картину изменения давления более реалистичной (рис. 6).

Таким образом, предлагаемый метод позволяет провести процедуру поверки и калибровки измерительных приборов в процессе эксплуатации ГТС без снятия приборов и применения какого-либо дополнительного оборудования. При расчетах эксплуатационных режимов систематические ошибки измерений будут должным образом учитываться, предотвращая неправильные оперативные решения. Применение предлагаемого метода не ограничивается рассмотренным примером. Эти идеи могут быть использованы применительно к ГТС другой структуры как тупиковым, так и закольцованным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены задача обнаружения момента возникновения утечек и незаконных врезок в нефте- и продуктопроводах, а также задача поверки измерительных приборов, установленных на объектах ГТС. Для решения задач предложены новые методы режимной диагностики.

Для обнаружения момента разгерметизации нефте- и продуктопроводов разработана методика, основанная на применении непараметрических методов скорейшего

обнаружения разладки случайного процесса. Для поверки измерительных приборов предложен метод, базирующийся на алгоритмах параметрической идентификации ГТС.

Обработка реальных данных телеметрии показала эффективность предлагаемых методов. Их реализация в производственной практике потребует минимальных затрат от эксплуатирующих организаций и позволит повысить безопасность и надежность функционирования ТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разлив нефтепродуктов в Уфе ликвидируют неделю. URL. <http://www.regnum.ru/news/economy/1918525.html> (дата обращения: 26.12.2017).
2. Транснефть устраняет последствия криминальной врезки в нефтепродуктопровод на землях Всеволожского лесничества. URL. <http://neftegaz.ru/news/view/156264-Transneft-ustranyaet-posledstviya-kriminalnoy-vrezki-v-nefteproduktoprovod-na-zemlyah-Vsevolozhskogo-lesnichestva> (дата обращения: 26.12.2017).
3. *Николай Токарев*: восточное направление экспорта нефти надолго останется премиальным. URL. <http://tass.ru/opinions/interviews/1993172> (дата обращения: 26.12.2017).
4. *Шестаков Р.А.* К вопросу о методах обнаружения утечек и несанкционированных врезок на магистральных нефтепроводах // Тр. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2015. № 1. С. 85–94.
5. *Никифоров И.В.* Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. М.: Наука, 1983.
6. *Бродский Б.Е., Дарховский Б.С.* Проблемы и методы вероятностной диагностики // Автомат. и телемех. 1999. № 8. С. 3–55.
7. *Сухарев М.Г.* Методы прогнозирования. Учебн. пособие. М.: РГУ нефти и газа, 2009.
8. *Zhu J., Abur A.* Identification of network parameter errors // IEEE Trans. Power Syst. 2006. V. 21, N2. P. 586–592.
9. *Колосок И.Н., Коркина Е.С., Гурина Л.А.* Анализ надежности результатов оценивания состояния по данным PMU при кибератаках на WAMS // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. В. 66. Актуальные проблемы надежности систем энергетики. Минск: БНТУ, 2015. С. 231–237.
10. *Сухарев М.Г., Самойлов Р.В.* Анализ и управление стационарными и нестационарными режимами транспорта газа. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2016.
11. СТО Газпром 2–3.5–051–2006. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. М.: ЗАО “Изд. Дом Полиграфия”, 2006.
12. *Сухарев М.Г., Косова К.О.* Идентификация параметров в моделях систем газоснабжения (метод и вычислительный эксперимент) // Тр. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2014. № 3. С. 60–68.
13. *Сухарев М.Г., Косова К.О.* Распознавание уровня работоспособности объектов системы газоснабжения по диспетчерской информации // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. В. 67. Проблемы надежности систем энергетики. Сыктывкар: Изд. ООО “Коми республ. типография”, 2016. С. 110–119.

УДК 621.3

**О ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛАХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОАКСИАЛЬНЫХ КОНТУРОВ**

© 2018 г. Г.Н. ЦИЦИКЯН

Филиал «ЦНИИ СЭТ» «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: George.20021940@mail.ru

Приведены альтернативные выражения для взаимной индуктивности и электродинамических сил взаимодействия круговых контуров (соленоидов и витков). Обоснована целесообразность их использования. Даны численные примеры и необходимые сравнения. Установлена связь присоединенной сферической функции Лежандра второго рода $Q_{1/2}^1(g)$ с полными эллиптическими интегралами первого и второго рода. Записаны удобные выражения для сферических функций со степенью $1/2$ при значении аргумента, близком к единице.

Ключевые слова: взаимная индуктивность, круговые контуры, электродинамические силы, соленоиды.

**ABOUT MUTUAL INDUCTANCE AND ELECTRODYNAMIC FORCES
OF INTERACTION OF COAXIAL CIRCUITS**

G.N. TSITSIKYAN

FSUE "CSRI MET" (Branch of the FSUE "Krylov State Scientific Center"), Saint Petersburg, Russia

E-mail: George.20021940@mail.ru

Alternative expressions for mutual inductance and electrodynamic forces of interaction of circular contours (solenoids and coils) are carried out. The expediency of their use is justified. Numerical examples and necessary comparisons are given. The connection of the attached spherical Legendre function of the second kind $Q_{1/2}^1(g)$ with complete elliptic integrals of the first and second kind is established. Convenient expressions for spherical functions with a power of $1/2$ are written for an argument close to unit.

Keywords: mutual inductance, coaxial circles, electrodynamic forces, solenoids.

В качестве отправных точек при сопоставлении расчетных выражений для коаксиальных контуров взято известное руководство [1] и статья [2]. Не останавливаясь на представлении [1], заметим, что в [2] приведен ряд выражений для взаимной индуктивности и сил взаимодействия, отличных от имеющихся в [1] и допускающих независимый путь получения численных результатов с использованием замкнутых форм. Кроме того, сопоставительным анализом достигается проверка рекомендуемых расчетных выражений.

Рассмотрим коаксиальный соленоид и виток в соответствии с рис. 1.

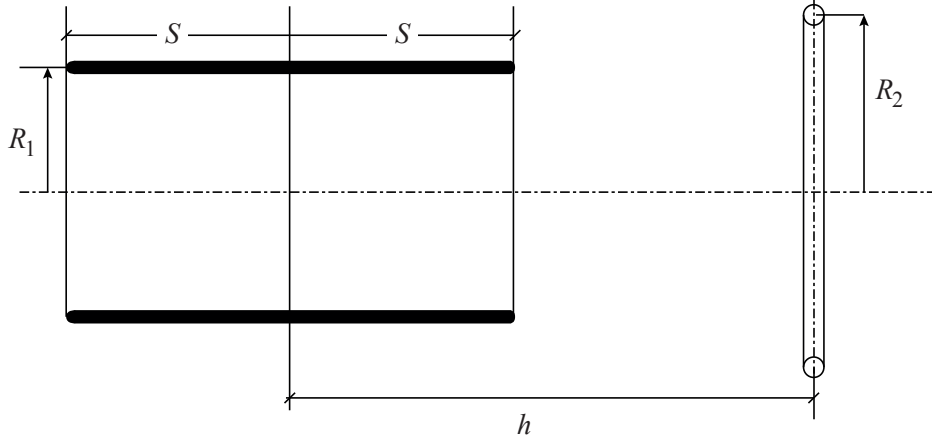


Рис. 1. Соленоид и виток с радиусами R_1 и R_2

В работе [2] для взаимной индуктивности двух соосных витков радиуса R_1 и R_2 (рис. 1 при $s \rightarrow 0$) записано выражение:

$$M_{|s \rightarrow 0, w_1=1, 0} = \mu \sqrt{R_1 R_2} Q_{1/2}(g), \quad (1)$$

где

$$g = 1 + \frac{[h^2 + (R_2 - R_1)^2]}{2R_1 R_2}. \quad (2)$$

Силы взаимодействия соленоида с числом витков w_1 и витка с током i_2 записана в виде:

$$f = -\frac{\mu_0 i_1 i_2 w_1}{(2s / R_1)} \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{1/2} [Q_{1/2}(g_1) - Q_{1/2}(g_2)], \quad (3)$$

где

$$g_{1,2} = 1 + \frac{(h \mp s)^2 + (R_2 - R_1)^2}{2R_1 R_2}, \quad (4)$$

выражение для силы взаимодействия двух витков с токами i_1 и i_2 получено в виде:

$$f = \mu_0 i_1 i_2 \frac{h}{\sqrt{R_1 R_2}} \frac{Q_{1/2}^1(g)}{(g^2 - 1)^{1/2}}, \quad (5)$$

где g совпадает с выражением (2).

Здесь $Q_{1/2}$ и $Q_{1/2}(g)$ – присоединенные сферические функции Лежандра второго рода со степенью $1/2$ (с полуцелым индексом).

Следует отметить, что обозначение z в [2] здесь заменено на h для исключения возможных недоразумений.

Для расчета и сопоставлений потребуются связи функций $Q_{1/2}(g)$ и $Q_{-1/2}(g)$ с полными эллиптическими интегралами первого и второго рода, взятыми из [3]:

$$Q_{1/2}(g) = g \sqrt{\frac{2}{g+1}} K \left(\sqrt{\frac{2}{g+1}} \right) - [2(g+1)]^{1/2} E \left(\sqrt{\frac{2}{g+1}} \right); \quad (6)$$

$$Q_{-1/2}(g) = \sqrt{\frac{2}{g+1}} K \left(\sqrt{\frac{2}{g+1}} \right). \quad (7)$$

На основе представления $Q_{1/2}^1(g)$ через $Q_{1/2}(g)$ и $Q_{-1/2}(g)$ в виде:

$$Q_{1/2}^1(g) = \frac{1}{2}(g^2 - 1)^{-1/2} [gQ_{1/2}(g) - Q_{-1/2}(g)]. \quad (8)$$

Из (6) и (7) получаем связь между $Q_{1/2}^1(g)$ и полными эллиптическими интегралами первого и второго рода:

$$Q_{1/2}^1(g) = 2^{-1/2} \left[(g-1)^{1/2} K\left(\sqrt{\frac{2}{g+1}}\right) - g(g-1)^{-1/2} E\left(\sqrt{\frac{2}{g+1}}\right) \right]. \quad (9)$$

При $g = 1 + \Delta g$ и $\Delta g \leq 0,5$ можно воспользоваться следующими приближениями [4, 5]:

$$Q_{1/2}(g) = Q_{1/2}(1 + \Delta g) = \frac{1 + \frac{3}{8}\Delta g}{2} \left[\ln\left(\frac{2 + \Delta g}{\Delta g}\right) - 1,2274 \right] + \frac{3}{8}\Delta g, \quad (10)$$

$$Q_{1/2}^1(g) = Q_{1/2}^1(1 + \Delta g) = \frac{3}{16}(2\Delta g)^{1/2} \left[\ln\left(\frac{2 + \Delta g}{\Delta g}\right) + 0,1059 \right] - \frac{1}{2} \left(\frac{2 + \Delta g}{\Delta g}\right)^{1/2} + \frac{3}{8}(2\Delta g)^{1/2}. \quad (11)$$

Подставив (6) в (1) и исходя из обозначения k для $\sqrt{\frac{2}{g+1}}$ и выражения (2) для g , найдем:

$$k = \sqrt{\frac{2}{g+1}} = \left[\frac{4R_1R_2}{h^2 + (R_1 + R_2)^2} \right]^{1/2}. \quad (12)$$

Тогда можно установить следующие равенства:

$$[2(g+1)]^{1/2} = \frac{2}{k}; \quad g = \frac{2-k^2}{k^2}; \quad gk = \frac{2}{k} - k.$$

В итоге приходим к известной формуле для взаимной индуктивности двух витков с радиусами R_1 и R_2 :

$$M = \mu_0 \sqrt{R_1R_2} \left[\left(\frac{2}{k} - k\right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right], \quad (13)$$

что говорит о достоверности выражения (1).

Обращаясь к выражению (9), запишем $Q_{1/2}^1(g)$ с учетом того, что $g-1 = 2\frac{1-k^2}{k^2}$, в виде:

$$\begin{aligned} Q_{1/2}^1(g) &= 2^{-1/2} \left[2^{1/2} \frac{(1-k^2)^{1/2}}{k} K(k) - \frac{2-k^2}{k^2} \frac{k}{2^{1/2}(1-k)^{1/2}} E(k) \right] = \\ &= \frac{(1-k^2)^{1/2}}{k} K(k) - \frac{2-k^2}{2k(1-k^2)^{1/2}} E(k). \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда для силы взаимодействия двух витков с токами i_1 и i_2 получаем через эллиптические интегралы:

$$\begin{aligned}
f &= \mu_0 i_1 i_2 \frac{h}{\sqrt{R_1 R_2}} \left[\frac{k}{2} \left(K(k) - \frac{2-k^2}{2(1-k^2)} E(k) \right) \right] = \\
&= \mu_0 i_1 i_2 \frac{h}{\left[h^2 + (R_1 + R_2)^2 \right]^{1/2}} \times \left[K(k) - \frac{2-k^2}{2(1-k^2)} E(k) \right]. \quad (15)
\end{aligned}$$

Формула (15) с точностью до знака совпадает с формулой для силы взаимодействия двух витков, данной в [6]. Таким образом, имеем два выражения для силы взаимодействия двух витков через присоединенную функцию Лежандра второго рода со степенью 1/2 (формула (5)) и через полные эллиптические интегралы первого и второго рода (15). В частности, при $R_1 = R_2 = R$ имеем:

$$f_{|R_1=R_2=R|} = \mu_0 i_1 i_2 \frac{Q_{1/2}^1 \left(1 + \frac{h^2}{2R^2} \right)}{\left(1 + \frac{h^2}{4R^2} \right)^{1/2}}. \quad (16)$$

Соответственно по формуле (15) в этом частном случае получим:

$$f = \mu_0 i_1 i_2 \frac{h/R}{\left[\left(\frac{h}{R} \right)^2 + 4 \right]^{1/2}} \left[K(k) - \frac{2-k^2}{2(1-k^2)} E(k) \right], \quad (17)$$

где

$$k = 2 \left[\frac{R^2}{h^2 + 4R^2} \right]^{1/2} = \frac{2R}{(h^2 + 4R^2)^{1/2}} = \frac{1}{\left[\left(\frac{h}{2R} \right)^2 + 1 \right]^{1/2}}. \quad (18)$$

Отметим, что численные значения $K(k)$ и $E(k)$ могут быть найдены по вспомогательным таблицам, имеющимся в справочном руководстве [7]. Но при $\frac{h}{R} \leq 0,1$ использование вспомогательных таблиц оказывается не вполне удобным, так как приходится применять интерполяцию для достижения точности. Так, при $\frac{h}{R} = 0,1$ имеем $k = 0,99883$; $k^2 = 0,9975$; $K(0,9988) \cong 4,3833$ и $E(0,9988) \cong 1,005$ по таблице 21.6–4 в [7].

В итоге находим:

$$f = \mu_0 i_1 i_2 \frac{0,1}{(4,01)^{1/2}} \left(4,383 - \frac{2-0,9975}{2(1-0,9975)} 1,005 \right) \cong -\mu_0 i_1 i_2 \cdot 9,844.$$

Теперь можно провести сопоставление с результатом по формуле (5), определив g по (2), затем $(g^2 - 1)^{1/2}$ и $Q_{1/2}^1$ по (11).

Тогда $g = 1,005$ и $\Delta g = 0,005$ и $Q_{1/2}^1(0,005) = -9,879$. Поэтому по формуле (5) результат вычисления равен $f = -\mu_0 i_1 i_2 \cdot 9,867$ с числовым множителем 9,867 против 9,844 с использованием таблиц с эллиптическими интегралами в [7] с применением интерполяции.

При $\frac{h}{R} = 0,08$ получаем $k = 0,9992$ и $k^2 = 0,9984$. Из таблицы 21.6–4 в [7] $K(0,9988) \cong 4,6043$ и $E(0,9988) \cong 1,0033$. Тогда

$$f = \mu_0 i_1 i_2 \frac{0,08}{\left[(0,08)^2 + 4 \right]^{1/2}} \left[K(0,9992) - 312,9998 E(0,9992) \right] = -\mu_0 i_1 i_2 12,368.$$

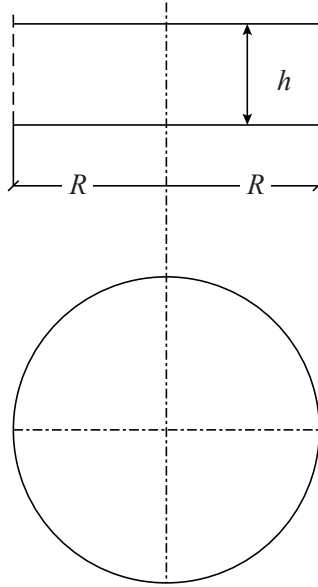


Рис. 2. Два витка одинакового радиуса

Сопоставим полученное значение с результатом по формуле (5), где $g = 1,0032$, $Q_{1/2}^1(1,0032) = -12,397$ и $f = -\mu_0 i_1 i_2 \cdot 12,357$ с числовым множителем 12,357 против 12,368, полученного с использованием таблиц с эллиптическими интегралами.

Представляет интерес воспользоваться другой возможностью, используя ряд (5)–(17) в [1] для коэффициента взаимной индукции двух витков одинакового радиуса, разнесенных на расстояние h (в оригинале x) в соответствии с рис. 2.

В этом случае при малом $\xi = \frac{h}{2R}$ можно пользоваться формулой [1]:

$$M = \mu_0 R \left[\left(1 + \frac{3}{4} \xi^2 - \frac{15}{64} \xi^4 + \dots \right) \ln \left(\frac{4}{\xi} \right) - 2 - \frac{1}{4} \xi^2 + \frac{31}{128} \xi^4 \dots \right]. \quad (19)$$

При $\frac{h}{R} = 0,1$ и $\xi = \frac{h}{2R} = 0,05$ для M получим:

$$M = \mu_0 R \left[\left(1 + \frac{3}{16} 0,1^2 - \frac{15}{64} \frac{0,1^4}{16} \right) \ln \left(\frac{8}{0,1} \right) - 2 - \frac{1}{16} 0,1^2 + \dots \right] \cong \mu_0 R \cdot 2,3896,$$

в соответствии с (1) и (10) при $g = 1 + \Delta g = 1 + \frac{h^2}{2R^2} = 1,005$ практически полное совпадение с предыдущим результатом.

Выражение для силы взаимодействия получим, дифференцируя (19) по h и умножая на произведение $i_1 i_2$. В результате с некоторым приближением имеем:

$$f \cong -\mu_0 i_1 i_2 \left(10 - 0,217 \cdot 0,1 - \frac{3}{4} 0,05 \ln 10 \right) = -\mu_0 i_1 i_2 9,892 \text{ по сравнению с } 9,867 \text{ и } 9,844, \text{ определенных ранее.}$$

В качестве примера рассчитаем силу, действующую на крайние ветки соленоида в соответствии с рис. 3. Сила определяется по формуле (3). В частности, при $R_1 = R_2 = R, i_1 = i_2 = i$ имеем:

$$f = -\frac{\mu_0 i^2 w}{(2s/R)} [Q_{1/2}(g_1) - Q_{1/2}(g_2)],$$

где $g_{1,2} = 1 + \frac{(h \mp s)^2}{2R^2}$, то есть $g_1 = 1 + \frac{(\Delta s)^2}{2R^2}$ и $g_2 = 1 + \frac{(2s + \Delta s)^2}{2R^2}$.

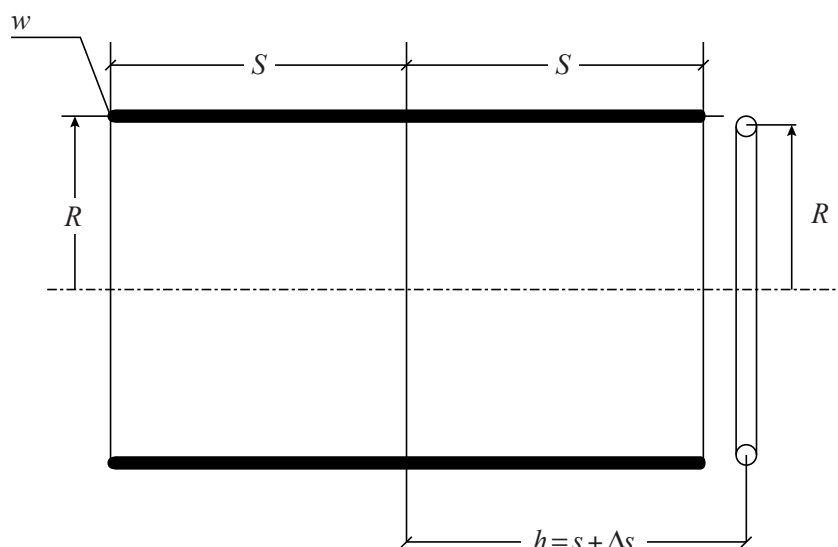


Рис. 3. Соленоид и виток при $R_1 = R_2 = R$

Полагая $w = 43$, $2s = 0,35 M$, $R = 0,159 M$, $\Delta s = 0,1 M$, конкретное выражение для расчета силы на крайние витки запишем в виде:

$$f = -4\pi \cdot 10^{-7} \frac{i^2 \cdot 43 \cdot 0,159}{0,35} [Q_{1/2}(1,002) - Q_{1/2}(3,563)].$$

На основании (6) получаем:

$$\begin{aligned} Q_{1/2}(3,563) &= 3,563 \sqrt{\frac{2}{4,563}} K\left(\sqrt{\frac{2}{4,563}}\right) - (2 \cdot 4,563)^{1/2} E\left(\sqrt{\frac{2}{4,563}}\right) = \\ &= 2,359 \cdot K(0,662) - 3,021 \cdot E(0,662) \cong 2,359 \cdot 1,8 - 3,021 \cdot 1,38 = 0,077. \end{aligned}$$

с использованием табличных значений для K и E от $m = k^2$ в [3].

В соответствии с (10) $Q_{1/2}(1,002) = 2,843$, откуда искомая разность равна 2,766. Поэтому при действующем значении тока $I = 600 A$ постоянная составляющая силы притяжения на крайний виток будет равна 24,44 Н или $\approx 2,5$ кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
2. Цицикян Г.Н. Взаимные индуктивности и силы взаимодействия соосных контуров, соленоидов и катушек // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. № 6. С. 90–99.
3. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. М.: Наука, ГРФМЛ, 1979.
4. Цицикян Г.Н. Электромагнитное поле и силовые взаимодействия цилиндрического индуктора с проводящей пластиной при импульсном токе // Электричество. 1998, № 9. С. 52–58.
5. Цицикян Г.Н. Векторный потенциал поля медленно движущихся тел в приложении к задачам электродинамической левитации // Изв. РАН. Энергетика. 1994. № 4. С. 130–144.
6. Смайт В. Электростатика и электродинамика. М.: Изд. иностр. лит., 1954.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. М.: Наука, ГРФМЛ, 1973.

УДК 697.341

**НЕКОТОРЫЕ АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПЕРЕХОДА
К БИВАЛЕНТНЫМ СИСТЕМАМ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ
ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

© 2018 г. В.В. СЕРГЕЕВ^{1*}, Я.А. ВЛАДИМИРОВ¹, Л.В. ЗЫСИН²

¹*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

²*Институт интегративных исследований, Хайфа, Израиль*

E-mail: vitaly.sergeev@spbstu.ru

Рассматриваются перспективы модернизации и развития систем централизованного теплоснабжения в условиях перехода к рыночной экономике. Проводится анализ существующих концепций развития систем теплоснабжения, методик оценки эффективности систем централизованного теплоснабжения. Отмечается большое значение, которое могут иметь системы с комбинированным бивалентным энергообеспечением, в том числе на основе тепловых насосов, а также энергетического использования твёрдых коммунальных отходов. Производится оценка потенциала энергетической утилизации твердых коммунальных отходов, приводится расчетная максимальная доля тепловой энергии, полученной из твердых коммунальных отходов в тепловом балансе населенного пункта. Анализируются результаты и опыт проектирования, ставятся задачи создания динамических алгоритмов расчёта, позволяющих учитывать динамику изменения исходных данных. Делаются предположения о направлениях дальнейшего развития теплоснабжения.

Ключевые слова: теплофикация, бивалентные схемы, радиус действия тепловой сети, коммунальные отходы, динамика развития.

**SOME TOPICAL THEORETICAL AND PRACTICAL ISSUES
OF TRANSITION TO BIVALENT SYSTEMS IMPROVING
THE CENTRALIZED HEAT SUPPLY**

V.V. SERGEEV^{1*}, I.A. VLADIMIROV¹, L.V. ZYSSIN²

¹*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia*

E-mail: vitaly.sergeev@spbstu.ru

The prospects of modernization and development of systems of the centralized heat supply in the conditions of transition to market economy are considered. The existing concepts for the development of heating systems, evaluation methods of efficiency of district heating systems are analyzed. The important role systems with combined bivalent power supply can play, including based on heat pumps and also energy use of civil waste is noted. The potential of energy recovery of municipal solid waste is estimated, the maximum portion of heat energy, produced from municipal solid waste, in settlement's demand of heat energy

is presented. Results and experience of designing are analyzed, problems of creation of the dynamic algorithms of calculation providing to consider dynamics of change of input data are defined. The trends of further development of heating systems are proposed.

Keywords: central heating, bivalent systems, radius of thermal network, municipal waste, dynamics of development.

Работа, посвящённая бивалентному энергоснабжению, использующему не один, а два разных по природе источников энергии, была выполнена В.А. Михельсоном [1, 2]. Он разработал индивидуальную систему отопления крупного общественного здания, построенную на комбинации теплового насоса и солнечного коллектора, которую назвал динамической.

В России в большинстве городов и промышленных центров сложились системы централизованного теплоснабжения, включающие ТЭЦ, укомплектованные паровыми турбинами большой мощности, из отборов которых покрывалась базисная часть тепловой нагрузки (~50% максимального теплоснабжения в самые холодные дни), пиковыми водогрейными котлами, предназначенными для резервирования теплоснабжения и обеспечения повышенной нагрузки отопления при низких температурах. Теоретическое основы теплофикации в нашей стране были заложены и развиты в работе [3]. По мере роста единичных установленных мощностей, экологических ограничений и других объективных факторов создались противоречия, связанные с централизованным теплоснабжением [4, 5].

При переходе к рыночной экономике возник интерес к различным видам бивалентного теплоснабжения, прежде всего, как средства повышения надёжности энергоснабжения [5]. Появилась необходимость разработки новой концепции теплоснабжения, с внесением соответствующих изменений в нормативы проектирования (СНиПы) и постановки задачи совершенствования и создание нового теплотехнического оборудования. При этом видна тенденция того, что крупные инвестиции в энергетику маловероятны. Это показывает гистограмма, составленная по данным Росстата (рис. 1), где видна динамика инвестиций в производство, передачу и распределение электроэнергии, газа, пара

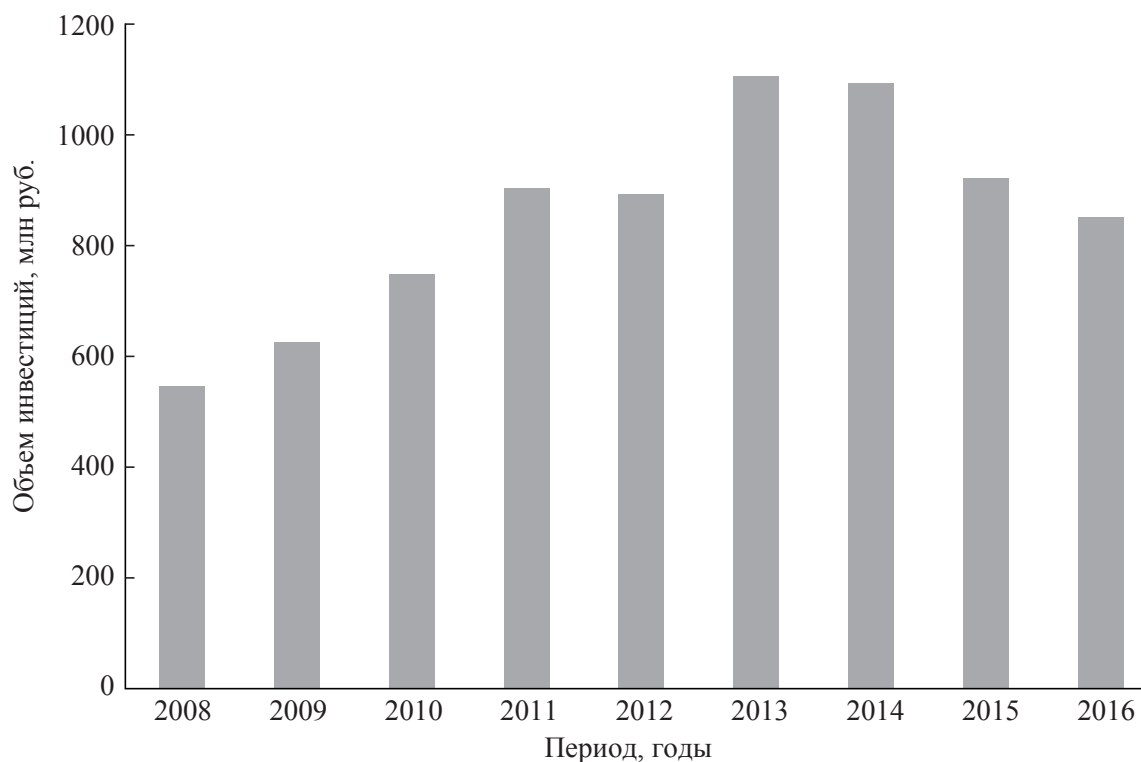


Рис. 1. Динамика инвестиций в производство, передачу и распределение электроэнергии, газа, пара и горячей воды

и горячей воды. Видно, что после 2013 г. уменьшаются вложения денежных средств в развитие энергетики.

Авторы предлагают рассмотреть результаты исследований и основные научные положения для проектирования, модернизации и развития систем теплоснабжения на современном этапе.

1. Созданию новой концепции теплоснабжения России были посвящены последние работы акад. М.А. Стыриковича [4]. Он предполагал необходимость надстройки всех относительно крупных котельных газовыми турбинами и переводу их в режим работы ТЭЦ. Расчёты показали, что, например, для условий Москвы любая система теплоснабжения, имеющая максимальную расчетную тепловую нагрузку $Q_{\text{макс}} > 11\text{--}24$ МВт при графике теплоснабжения, типичном для коммунальных ТЭЦ будет рентабельной при надстройке ГТУ, имеющей КПД $\geq 35\%$. Для регионов с более суровым климатом указанные граничные величины оказываются еще ниже, и для производственных потребителей тепла с летней нагрузкой 50–60% от максимально-расчетной надстройки могут быть эффективными при $Q_{\text{макс}} \div 3.5$ МВт. Достаточно надстроить 40% котельных средней мощности ($Q_{\text{расч}} = 7 \div 8$ МВт) и 80% крупных котельных в Европейской части страны, чтобы в ближайшие 15–20 лет полностью отказаться от строительства новых КЭС. И стоимость электроэнергии будет ниже, что может стать важным фактором снижения тарифов на электроэнергию в дальнейшем. Это в настоящее время практически не учитывается в обсуждениях по реформированию электроэнергетики. Позднее идеи работы [4] нашли отражение в энергетической стратегии РФ, где обозначен приоритет комбинированной выработки тепловой и электрической видов энергии [6], при этом необходимо учитывать рациональность переоборудования котельных в источники комбинированной выработки. У генерируемой электрической энергии должен быть свой потребитель. Цель работы котельных – производство тепловой энергии, электроэнергия для таких источников, в отличие от классических ТЭС, будет побочным продуктом, график ее выработки будет определяться графиком производства тепловой энергии. Тотальное переоборудование источников теплоснабжения средней и большой мощностей приведет к следующим последствиям: появление на рынке большого количества электрической энергии, зависимость количества вырабатываемой электроэнергии от потребления тепловой энергии. В табл. 1 приведены данные прогноза баланса генерирующих мощностей ЕЭС России [7], которые показывают, что в ЕЭС России существует значительный избыток генерирующих мощностей.

Следовательно, появление на рынке электроэнергии новых мощностей без возможности обеспечения гибкого графика нагрузки, по-видимому, не будет обеспечено спросом.

Таблица 1

Баланс генерирующих мощностей ЕЭС России, МВт

Параметр	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Максимум потребления мощности, МВт	154748	156489	158289	159949	161498	163089	164598
Нормативный резерв	25118	25410	25684	25927	26183	26453	26716
Экспорт	3838	3438	3338	3338	3338	3338	3338
Спрос на мощность. Всего	183704	185337	187311	189214	191019	192880	194652
Установленная мощность электростанций (факт., 2016 г.)	236343.6	236343.6	236343.6	236343.6	236343.6	236343.6	236343.6
Итого резерв, МВт	52639.6	51006.6	49032.6	47129.6	45324.6	43463.6	41691.6
Итого резерв, %	22	22	21	20	19	18	18

При работе данных источников в базе нагрузки будет снижен коэффициент использования установленной мощности объектов крупной энергетики – ГЭС и АЭС, что приведет к повышению стоимости электрической энергии, генерируемой на этих объектах. Поэтому решение о переоборудовании котельной в источник комбинированной выработки должно приниматься для каждого объекта на основании технико-экономических расчетов с учетом модели рынка электрической энергии и мощности, при наличии гарантированного потребителя вырабатываемой электроэнергии.

2. Наряду с крупными энергогенерирующими установками, такими как паровые турбины противодавления и конденсационные с отборами пара, газовыми турбинами с утилизацией теплоты выхлопных газов для целей отопления и горячего водоснабжения (ГВС), в системах централизованного энергоснабжения теплоснабжение должно увеличиваться за счёт применения локальных установок средней и малой мощности, прежде всего ГТУ, двигателей внутреннего сгорания (газопоршневых, газодизельных и дизельных) с утилизацией теплоты систем охлаждения и выхлопных газов двигателя. Высокая надёжность подобных установок делает их незаменимыми при покрытии суточных и сезонных пиковых нагрузок. Однако номенклатура подобных установок, выпускаемых промышленностью, ограничена. На рынке есть предложения от авиационных фирм, осуществивших конверсию своих двигателей для наземных условий за счёт снижения их экономичности, а доводочные работы по перспективным отечественным разработкам, таким как, например, ГТЭ-65, предполагают длительные сроки.

3. В себестоимости энергетической продукции топливная составляющая в зависимости от региона различается и находится в диапазоне 19–57%. При этом топливная составляющая в стоимости тепловой энергии от комбинированных источников выше, чем от котельных. На рис. 2 приведены результаты обобщения значений топливных составляющих тарифа на тепловую энергию в различных регионах.

Стоимость топлива постоянно растёт, поэтому всё большее значение в топливном балансе будут иметь местные виды топлива. Для большинства регионов России это органосодержащие промышленные и бытовые отходы, древесина, отходы её переработки и торф. Следует отметить, что при транспортировке стоимость такого топлива увеличивается, поэтому оно должно перерабатываться в близко расположенном месте. Проблема хранения, размещения и утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является у нас в стране важной, поэтому следует оценить технические возможности использования ТКО в бивалентных схемах при развитии и расширении действующих систем централизованного теплоснабжения.

В регионах, как правило, отсутствуют достоверные оценки ресурсов ТКО. На стадии разработки различных документов стратегического развития муниципальных образований (МО) авторы на основе региональных данных провели оценку количества твердых коммунальных отходов и рассчитали потенциальную долю теплоты, полученной из отходов, в тепловом балансе МО; ее результаты приведены в табл. 2. Из нее видно, что от 2 до 7% спроса на тепловую энергию может быть удовлетворено за счет энергетической утилизации ТКО. Из анализа зарубежных источников можно предположить, что при внедрении прогрессивных систем селективного сбора ТКО, современных технологий их переработки и экологически чистого сжигания, доля ТКО в тепловом балансе теплоснабжения может быть увеличена. Следует отметить, что энергетическое использование ТКО позволит успешно решить и некоторые сложные экологические проблемы, например, плазменная утилизация – обезвреживание токсичной части отходов [8] и т.п.

Использование местных топлив в перспективе – ещё один фактор снижения тарифов. При этом следует различать новые по технологическим признакам и формам применения установки малой и средней мощностей, работающие на местном топливе в составе бивалентных систем централизованного энергоснабжения, где они экономят топливо, расширяют зоны обслуживания и повышения надёжности энергоснабжения, от моновалентных установок на местном топливе (прежде всего органосодержащих отходах), работающих в составе крупных ТЭЦ с паротурбинными блоками различной конструкции, серийно

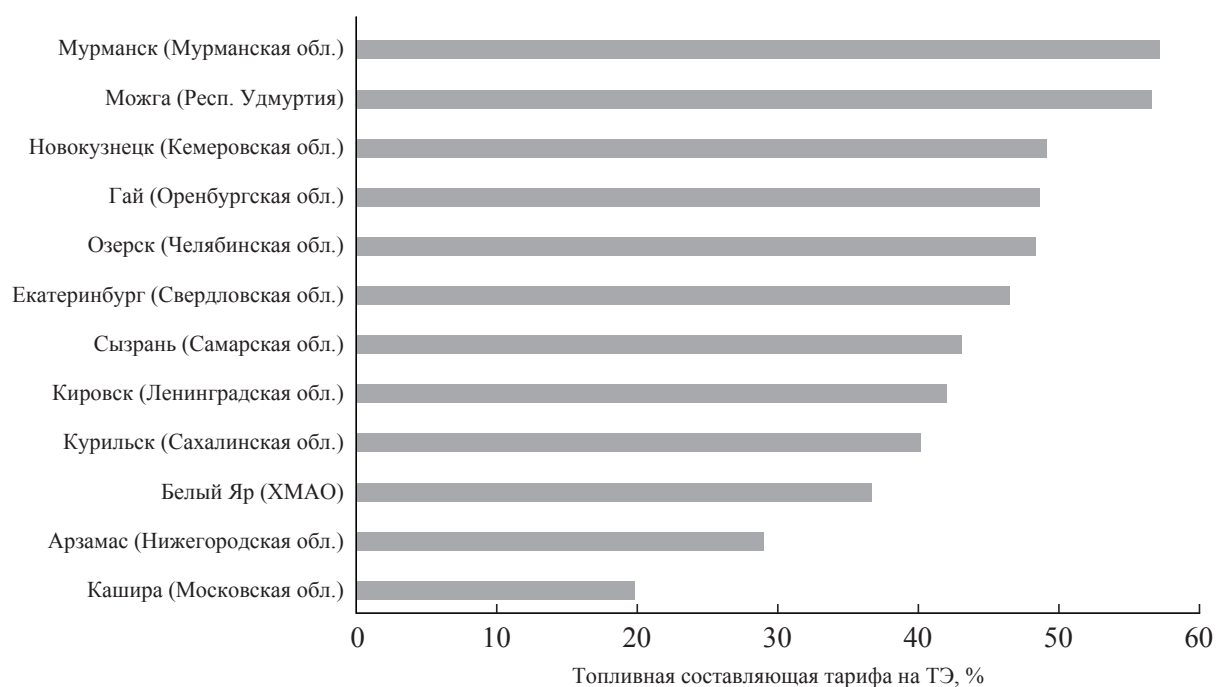


Рис. 2. Топливная составляющая тарифа на тепловую энергию в различных регионах РФ

Таблица 2

Оценка теплового потенциала ТКО в различных городах РФ (МО)

Наименование МО	Оценочная масса ТКО, т/г	Потенциальное количество теплоты ТКО, ГДж	Годовая потребность абонентов МО в тепловой энергии, ГДж	Тепловой потенциал ТКО, %
Петрозаводск	79387	225280	9600855	2.3
Екатеринбург	979238	2778831	71816672	3.9
Няндома (Архангельская обл.)	6123	17377	525392	3.3
Кировск (Ленинградская обл.)	12340	35017	812590	4.3
Саратов	384682	1091629	16125465	6.8
Санкт-Петербург	2062193	5851981	185185593	3.2

выпускаемых промышленностью и решающих преимущественно задачи утилизации отходов, а затем экономии топлива.

5. Наиболее изученным источником дополнительной энергии для систем бивалентного теплоснабжения являются теплонасосные установки (ТНУ). Если исключить случаи термотрансформации низкопотенциального тепла, отводимого в ряде технологических процессов (сушка, выпаривание, ректификация и т.п.), то целесообразность применения для отопления теплового насоса в каждом конкретном случае требует доказательства. Использование теплового насоса вместо ТЭЦ в общем случае увеличивает расход топлива энергосистемой и капитальные вложения в неё, а замещение тепловыми насосами отдельных котельных может дать экономию топлива, но потребует больших капитальных вложений.

Обзор исследований, посвящённых разграничению областей применения ТЭЦ, ТНУ и котельных [9], показал, что применительно к техническим возможностям и изменяющимся экономическим условиям установленные в них границы приблизительны. Ориентируясь на конкретные величины потерь в машинах и механизмах, тарифы,

климатические зоны и т.п. значения коэффициента эффективности ϕ , выше которого использование ТНУ может быть целесообразным, изменяются от 2 до 8. Применительно к отопительным системам коэффициент ϕ аналогичен отопительному коэффициенту. Целесообразность использования теплонасосных установок требуют технико-экономического расчета для каждого случая. Например, оценка экономической эффективности создания локальной системы теплоснабжения общественно-делового здания ($Q_{\text{ов}} = 0.495 \text{ МВт}$; $Q_{\text{нсс.час}} = 0.052 \text{ МВт}$), расположенного на территории Санкт-Петербурга, с помощью теплового насоса [5], в которой были рассмотрены три способа теплоснабжения: от системы централизованного теплоснабжения, с электронагревом ГВС в период отключения централизованного теплоснабжения; случай, когда с помощью каскадов тепловых насосов, работающих на отопление и вентиляцию, греют питательную воду до $35 \text{ }^\circ\text{C}$, а тепловые насосы, обеспечивающие ГВС, греют горячую воду до $55 \text{ }^\circ\text{C}$; случай, когда все тепловые насосы греют питательную воду до $35 \text{ }^\circ\text{C}$, а догрев ГВС производится термоэлектрическими нагревателями.

Оценка показала, что годовая доходность альтернативных вложений от разницы в стоимости создания локальной системы теплоснабжения от ТНУ и подключения к системе централизованного теплоснабжения превышает годовую экономию денежных средств теплоснабжения здания, полученную при использовании тепловых насосов. Следовательно, в рассмотренном случае создание системы теплоснабжения от теплового насоса не окупится.

Существует ряд комбинированных схем утилизации теплоты продуктов сгорания в котельных установках, вторичной теплоты в двигателях внутреннего сгорания, эффективно использующих переменность сезонных и суточных графиков нагрузки тепловых систем, для которых применение тепловых насосов дает новые возможности, в том числе и в сочетании с современными тепловыми аккумуляторами.

Сравнение термодинамических циклов ТНУ и ТЭЦ показывает, что при работе по идеальным обратимым циклам Карно, теплоснабжение с помощью теплового насоса и теплофикационной турбины равноценны. Разница только в способе связи с потребителями. Для ТЭЦ – это теплопровод, для ТНУ – электропередача. Однако ТЭЦ при современных способах передачи тепла имеет ограниченный радиус действия. При удалении от ТЭЦ эффективность теплофикационной системы снижается; растут затраты энергии на сетевые насосы, тепловые потери в окружающую среду, падает граничная температура сетевой воды. И на некотором расстоянии от ТЭЦ теплоснабжение от ТНУ становится экономически более выгодным [9].

В оптимизации зон централизованного теплоснабжения и обоснованном выборе источников тепловой энергии для перспективных потребителей существует потенциал энергосбережения и экономии денежных средств. Сравнение показателей энергоэффективности на стадии выбора варианта источника теплоснабжения позволяет исключить малоэффективные предложения инвестиционных проектов. Для сравнения вариантов необходимо иметь единый показатель (единый критерий энергоэффективности различных источников энергоснабжения). Для оценки энергетической эффективности централизованного теплоснабжения от теплоисточников определяется граница эффективности такого вида теплоснабжения из условия, что данный способ теплоснабжения будет эффективнее по сравнению с децентрализованным теплоснабжением [10].

Концептуально оптимальную зону теплоснабжения предлагалось определять из условия минимума выражения для “удельных стоимостей сооружения тепловых сетей и источника” [11]:

$$S = A + Z \rightarrow \min, \quad (1)$$

где A – удельная стоимость сооружения тепловой сети, руб./Гкал/ч; Z – удельная стоимость сооружения котельной (ТЭЦ), руб./Гкал/ч.

Формула (1) учитывает только капиталовложения без стоимости тепловой энергии для потребителя. Для учета постоянных и переменных затрат в системе теплоснабжения

введено понятие предельного радиуса действия тепловых сетей от источника централизованного теплоснабжения:

$$R_{\text{пред}} = \left[\frac{(p - C)}{1,2 \cdot K} \right]^{2,5}, \quad (2)$$

где p – разница себестоимости тепла, выработанного на ТЭЦ и в индивидуальных котельных абонентов, руб./Гкал; C – переменная часть удельных эксплуатационных расходов на транспорт тепла, руб./Гкал; K – постоянная часть удельных эксплуатационных расходов на транспорт тепла при радиусе действия тепловой сети 1 км, руб./Гкал.км. Зависимость (2) содержит эмпирические коэффициенты, корректность их использования требует доказательства.

Одним из успешных исследований направления стала работа [12], где предлагается метод решения трёх типовых задач, связанных с развитием систем централизованного теплоснабжения: сравнение фактически сложившегося радиуса теплоснабжения с радиусом эффективного теплоснабжения; определение возможности расширения существующей зоны действия источника тепловой энергии в зону перспективного строительства; оценка последствий перераспределения тепловой нагрузки между источниками с пересекающимися зонами действия.

При определении возможности расширения зоны действия источника для подключения новых потребителей необходимо оценивать эффект от подключения и для перспективных потребителей (метод альтернативной котельной), и для существующих потребителей тепловой энергии (условия, при которых подключение новых потребителей не приводит к росту совокупных удельных затрат в системе).

Согласно методике [12], расчет зоны эффективного теплоснабжения включает следующие виды задач:

Сбор исходных данных для расчета.

Определение прогнозных тепловых нагрузок территории, для которой происходит расчет.

Определение расстояния от точки подключения к существующей тепловой сети до нового потребителя.

Гидравлический расчет системы теплоснабжения для определения характеристик строящихся тепловых сетей и выявление необходимости перекладки существующих тепловых сетей с увеличением диаметра.

Составление перспективного баланса тепловой мощности источника тепловой энергии.

Составление балансов производства тепловой энергии, потребления топлива, воды и электроэнергии. Для источников комбинированной выработки тепловой и электрической видов энергии составляется баланс выработки электроэнергии.

Определение совокупных затрат для различных вариантов теплоснабжения перспективного потребителя.

Сравнение совокупных затрат для разных вариантов.

Таким образом, зона эффективного теплоснабжения для существующего источника тепловой энергии представляет собой не константу, она зависит от подключаемой нагрузки перспективного потребителя. Для существующего источника тепловой энергии зона должна быть определена для каждой потенциальной точки подключения (тепловой камеры). Для тепловой камеры зона эффективного теплоснабжения будет в общем случае представлять собой окружность и характеризоваться радиусом эффективного теплоснабжения. Результаты расчета параметров зоны эффективного теплоснабжения от существующего источника централизованного теплоснабжения для тепловой камеры приведены на рис. 3.

При расчетах предполагалось, что точка подключения перспективного потребителя расположена в конкретной тепловой камере, то есть для каждой тепловой камеры расчет будет индивидуален, но рис. 3 показывает характер изменения радиуса эффективного теплоснабжения для любой точки подключения. Зависимости для разных тепловых камер отличаются координатами точек перегиба и экстремумов.

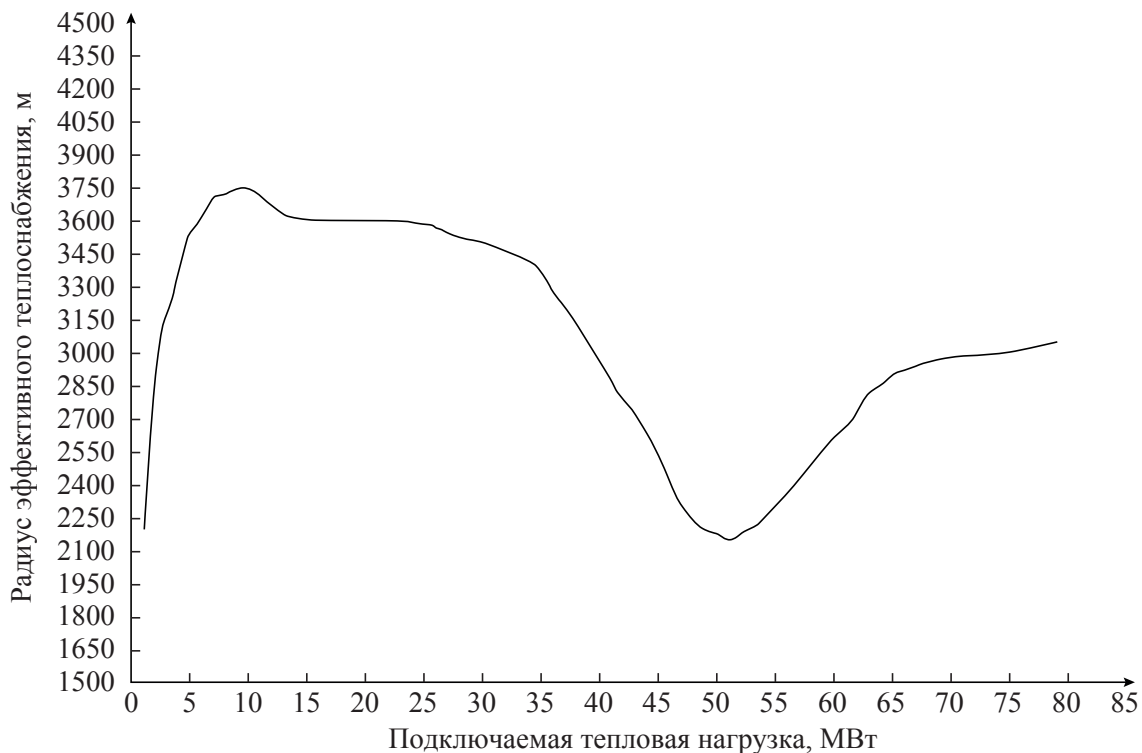


Рис. 3. Радиус эффективного теплоснабжения котельной

Из рис. 3 следует, что при подключении к системе теплоснабжения потребителя с нагрузкой до 9.3 МВт зона эффективного теплоснабжения котельной увеличивается. Последующее снижение радиуса эффективного теплоснабжения обусловлено необходимостью перекладки ряда участков тепловой сети. Чем выше подключаемая нагрузка, тем больше участков нужно переложить с увеличением диаметра и тем больше расчетный диаметр реконструируемой тепловой сети. Объем необходимой перекладки тепловых сетей определялся серией гидравлических расчетов системы теплоснабжения, проведенных в расчетно-программном комплексе Zulu Thermo. Учитывая, что расчет в общем случае должен быть произведен для каждой тепловой камеры, целесообразно его провести при определении эффективности подключения к системе теплоснабжения конкретного потребителя, когда известна величина подключаемой нагрузки, местоположение потребителя, ограничен выбор точек подключения.

При подключении потребителя тепловой энергии с нагрузкой более 51 МВт наблюдается возобновление роста радиуса эффективного теплоснабжения, что связано с характером изменения стоимости трубопроводов в зависимости от диаметра. Таким образом, при превышении расстояния, полученного при проведении описанного расчета, от точки подключения до абонента целесообразно рассматривать возможность теплоснабжения абонента от альтернативных источников энергии – автономной котельной, ТНУ и пр. [12].

Дополнительные возможности для развития теплофикации возникают при применении для привода теплового насоса поршневых машин, работающих на газе. Использование генераторного газа, получаемого из органосодержащих бытовых и промышленных отходов, позволит для тривалентного теплоснабжения, и при экономических оценках следует учитывать вклад подобных систем в экологию, но для этого нет обоснованных экономических данных и нормативов.

Значение термодинамического анализа при выборе источников энергии и типе схемы теплоснабжения имеют факторы регионального и местного значения. К ним следует отнести соотношение долей бытового и промышленного теплопотребления, наличие источников низкопотенциального тепла и местных топливных ресурсов, динамика суточных

и сезонных графиков нагрузок, состояние и тип существующих тепловых схем, техническая возможность и экономическая целесообразность их модернизации. Кроме того, уровень квалификации и опыт эксплуатационного персонала может стать ограничением при выборе эффективных, но относительно менее надёжных систем теплоснабжения. Современный этап развития САПР позволяет обсуждать комплексное решение на стадии проектирования. Но его реализация требует обобщённых данных по проектированию, монтажу и эксплуатации для конкретных объектов, отличающихся типом и масштабам потребления, климатическими и региональными условиями, одновременно позволяющим учитывать динамику изменения внешних условий, включающую развитие объекта исследования.

Бивалентные системы теплоснабжения являются одним из важных элементов изложенного подхода.

6. Современный этап развития энергетики связан с расширением использования НВИЭ. Можно ожидать, что эта тенденция будет продолжаться при совершенствовании и удешевлении систем НВИЭ. Кроме ТНУ и БЭУ начинает применяться солнечная энергетика и геотермальная энергия. И если это не автономные установки, то они должны комбинироваться с традиционными системами. Энергетические системы, включающих три и более источников энергии, увеличивают радиус их обслуживания, повышают надёжности действующих систем и снижения стоимости продаваемой энергии. Тогда как формальное сложение двух систем энергоснабжения приводит к удорожанию установки и дискредитируют идею [13].

Если использование локальных солнечных коллекторов может быть эффективным дополнением к традиционным системам теплоснабжения, а в ряде южных стран полностью их замещающих, то снижение себестоимости “солнечного” электричества может изменить стратегию и схемы теплоснабжения. Дешёвая электроэнергия поднимет уровень эффективности ТНУ и сделает актуальным переход непосредственно к теплоснабжению на основе электрической энергии. Положительный опыт такого использования уже имеется за рубежом и у нас в стране. Так в районе Саяно-Шушенской ГЭС при избытке электрической энергии применяется электрическое отопление на ряде промышленных предприятий.

7. Развитие бивалентных систем теплоснабжения связано с совершенствованием методов проектирования, оценкой их эффективности и определением показателей для сравнения с традиционными системами.

Длительное время подобные методы базировались на разных модификациях диаграммы Синкея, строго учитывающей только принцип сохранения энергии. Отмечалась односторонность такого подхода, и необходимость учитывать потери работоспособности (эксергии) рабочего тела, связанные со вторым началом термодинамики. Эксергетические методы исследования улучшили теоретическую часть термодинамических расчётов в теплоэнергетике [14–17]. Но задача в области анализа энергетических установок по увязке термодинамического анализа с экономикой энергетики пока не решена [18].

В методике [18] предполагает, что величина субъективного удельного перерасхода топлива численно характеризует потенциал экономии топлива, который может быть реализован в результате улучшения характеристик оборудования до проектных значений. То есть замена или ремонт оборудования требуют капитальных затрат, но приводят к экономии топлива. Оценка эффективности затрат на ремонт или замену оборудования ТЭЦ характеризуется сроком окупаемости и определяется зависимостью:

$$\text{ЧДП}p^t = \sum_{t=0}^{T_{\text{ок}}} \left[b_{\text{П}}^{j,\text{суб}} + b_{\text{П}}^{j,\text{суб}} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^{j-1} \Omega_i \right) \right] \cdot \text{Ц}_{\text{топл}} \cdot E_{\text{ТЭЦ}}^t \cdot (1 - e)^{-t} = 0, \quad (3)$$

где $\text{ЧДП}p^t$ – чистая дисконтированная прибыль за период времени t ; $T_{\text{ок}}$ – срок окупаемости; $b_{\text{П}}^{j,\text{суб}}$ – субъективный удельный перерасход топлива на элементе j ; $\sum \Omega_i$ – сумма коэффициентов эксергических потерь; $\text{Ц}_{\text{топл}}$ – средняя прогнозируемая цена топлива на период времени t ; e – норма дисконтирования; E – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; j – порядковый номер элемента в цепи энергетических превращений.

Данную методику для бивалентных систем теплоснабжения необходимо дорабатывать, так как с учетом использования вторичных энергоресурсов, потери в системе не могут быть сведены к перерасходу топлива. При этом, например, для анализа систем с ТНУ задача усложняется тем, что приведенные в литературе зоны эффективной работы ТНУ получены для конкретных параметров системы, а КПД турбомашин, входящих в систему в зависимости от их конструкции и мощности, могут сильно меняться, что ограничивает применение полученных ранее результатов. Из опыта проектирования и эксплуатации систем теплоснабжения создается массив данных для разных условий, в нем учитываются объективные и субъективные факторы эксплуатации. Данные становятся основой функционирования системы автоматического проектирования, базирующейся на существующих и новых алгоритмах расчёта отдельных элементов системы с алгоритмами их взаимодействия и развития.

8. Ряд директивных документов определяют стратегическое планирование в теплоснабжении, организацию эффективного и безопасного функционирования систем теплоснабжения поселений, городских округов, их развития с учетом правового регулирования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности [6, 7, 19, 20]. Согласно [19] до 2030 г. предполагается рост значения возобновляемых источников энергии в обеспечении энергетических потребностей общества.

Авторы располагают опытом работы в рамках действия указанных документов. Разработаны и утверждены десятки схем теплоснабжения различных муниципальных образований с численностью населения от 1 до 550 тыс. чел. Опыт проектирования и сопровождения проектов с постоянной корректировкой, учитывающую динамику изменения местных условий, позволяет по-новому ставить задачу проектирования. Оптимизация проектных решений требует совершенствования методов проектирования, создания алгоритма динамического проектирования. Схема теплоснабжения подлежит ежегодной актуализации [20], что позволит оперативно учитывать фактические темпы реализации схемы теплоснабжения, развитие городской застройки, макроэкономическую ситуацию.

Применение методов динамического проектирования в стратегическом планировании позволит избежать недостатков долгосрочного планирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить некоторые предположения дальнейшего развития централизованного теплоэнергоснабжения. В обозримый период энергетика будет развиваться преимущественно на базе мощных комбинированных парогазовых блоков, с термодинамическим КПД = 55÷65%. Прогресс в энергетике, по-видимому, будет связан с гибридными энергосистемами. Успешное применение технологии ферментативных топливных элементов, не чувствительных к засорению газов сероводородом и монооксидом углерода позволяет использовать для прямого преобразования в электрическую энергию биоводорода, получаемого из коммунальных отходов [21].

Так как будет увеличиваться доля в энергетическом балансе местных, локальных источников энергии (ТНУ, солнечных коллекторов, геотермальных источников, утилизаторов биомасс и отходов её переработки, ветродвигателей и т.п.), то использование бивалентных (или поливалентных) централизованных систем будет всё более эффективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Михельсон В.А.* О динамическом отоплении // Ж. прикл. физики, 1926. Т. III. Вып. 3–4. С. 243–260.
2. *Thomson W.* On the economy of heating or cooling of building by means of currents of air // In: *Mathematical and Physical Papers.* V. 1. Cambridge: University press, 1882. P. 515–520.
3. 100 лет теплофикации России / под ред. В.Г. Семенова. М.: Новости теплоснабжения, 2003. 6 с.

4. *Стырикович М.А.*. Теплотехника и теплофизика. Экономика энергетики и экология. Воспоминания. М.: Наука, 2002. 319 с.
5. *Владимиров Я.А., Сергеев В.В.* Анализ технико-экономической эффективности использования теплового насоса // Материалы ХLI научно-практической конф. с международным участием «Неделя науки СПбГПУ». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 126–127.
6. Федеральный закон “О теплоснабжении “ от 27.07.2010 № 190-ФЗ;
7. Приказ Минэнерго России от 01.03.2017 № 143 “Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2017–2023 годы”.
8. *Sergeev V.V., Vladimirov I.A., Kalinina K.S., Kozhukar E.V.* Gasification and plasma gasification as type of the thermal waste utilization // Construction of Unique Buildings and Structures. 2016. № 12. P. 85–93.
9. *Янтовский Е.И., Пустовалов Ю.В.* Парокомпрессионные теплонасосные установки. М.: Энергоатомиздат., 1982. 141 с.
10. *Плахута А.Д.* Современный подход к выбору оптимального источника теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 2. С. 33–38.
11. *Папушкин В.Н.* Радиус теплоснабжения. Хорошо забытое старое // Новости теплоснабжения. 2010. № 10. С. 44–49.
12. *Папушкин В.Н., Полянцев В.А., Щербаков А.П., Храпков А.А.* Методика расчета радиуса эффективного теплоснабжения для схем теплоснабжения. 2014. URL: http://www.gosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1601 (дата обращения 16.10.2017)
13. *Зысин Л.В., Сергеев В.В.* Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Ч. 1. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 191 с.
14. *Андрющенко А.И.* Техническая работоспособность термодинамических систем. Саратов: Изд. Саратовского автодорожного ин-та, 1956. 144 с.
15. *Бошнякович Ф.* Техническая термодинамика. М. – Л: Госэнергоиздат. Т. 1, 1955. 440 с.; Т. 2, 1956. 255 с.
16. *Бродянский В.М.* Эсергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. 269 с.
17. *Гохштейн Д.П.* Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. М.: Энергия, 1969. 368 с.
18. *Боровков В.М., Скулкин С.В.* Применение энтропийного и эксергетического методов для выявления мест локализации субъективных энергетических потерь // Надёжность и безопасность энергетики. 2010. № 3. С. 27–30.
19. Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р “Об энергетической стратегии России на период до 2030 года”.
20. Постановление Правительства Российской Федерации “О требованиях к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения” от 22.02.2012 № 154.
21. *Василов Р.Г., Решетилов Д.Н., Шестаков А.И.* Биотопливные элементы // Природа. 2013. № 12. С. 65–70.

УДК 504.05:621.039

**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА “БАКИС”
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВОДНЫХ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

© 2018 г. А.Л. КРЫЛОВ, А.В. НОСОВ, Д.В. АРОН, В.П. МЕРКУШОВ

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

E-mail: vpm@ibrae.ac.ru

Разрабатываемый расчетно-прогностический комплекс (РПК) “Бакис” предназначен для прогнозирования и ретроспективной оценки радиоактивного загрязнения поверхностных водных объектов в районах расположения российских объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) с учетом основных факторов, определяющих миграцию радиоактивных веществ в водной среде. Использование комплекса направлено на решение ряда практических задач, включая вопросы обоснования радиационной и экологической безопасности ОИАЭ в период их функционирования и при выводе из эксплуатации, расчеты допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты действующими и проектируемыми ОИАЭ, оценку средне- и долгосрочных последствий загрязнения водных объектов, поддержку принятия решений по контрмерам в случаях аварий, расчет трансграничного переноса радиоактивных веществ в водной среде и др.

Рассмотрены основные пути поступления радиоактивных веществ в водные объекты, факторы, события, процессы и явления, определяющие их распространение и накопление в водных объектах, определены приоритетные функциональные требования к разрабатываемому РПК.

Ключевые слова: Радиоэкология, радиоактивное загрязнение, водные объекты, модели миграции радиоактивных веществ, прогноз и оценка последствий сбросов, расчетно-прогностический комплекс, обоснование безопасности объектов.

**DEVELOPMENT OF COMPUTATIONAL SOFTWARE SYSTEM “BAKIS”
FOR SOLVING AQUATIC RADIOECOLOGICAL PROBLEMS**

A.L. KRYLOV, A.V. NOSOV, D.V. ARON, V.P. MERKUSHOV

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN), Moscow, Russia

E-mail: vpm@ibrae.ac.ru

A computational prognostic system (CPS) “BAKIS” is intended for forecasting and assessing a radioactive contamination of surface water objects in the vicinity of Russian nuclear facilities taking into account major factors defining migration of radioactive substances in aquatic medium. The system will be used for solving various practical problems such as radiation and ecological safety cases for nuclear facilities during their operation and in the process of decommissioning, calculation of permissible discharges of radioactive substances into water objects by operating and designed nuclear facilities, assessment of medium- and long-term consequences of a water object contamination,

support to decision-making on counter-measures in the events of accidents, calculation of transboundary transfer of radioactive substances in aquatic medium, etc.

The basic paths of radioactive inflows to water objects, factors, events, processes and phenomena defining their distribution and accumulation in water objects are discussed as well as the key requirements to the developed CPS.

Keywords: Radioecology, radioactive contamination, water objects, models of radioactive substance migration, forecast and assessment of discharge consequences, computational prognostic system, safety case.

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз и оценка радиоактивного загрязнения поверхностных водных объектов является важной практической задачей радиоэкологии. В настоящее время существуют отечественные и зарубежные модели, в том числе реализованные в виде компьютерных программ, позволяющие прогнозировать содержание радиоактивных веществ (РВ) в основных компонентах водных объектов и проводить расчеты дозы облучения населения по “водным цепочкам” в районах расположения объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Однако каждое из этих программных средств (ПС) имеет определенные ограничения: наборы рассматриваемых процессов и способы их учета, моделируемые режимы, типы моделируемых водных объектов и др., ограничивающие возможности их практического применения. Следует отметить сложности моделирования, связанные с необходимостью получения труднодоступных входных данных, в том числе параметров моделей, разрешающей способностью моделей и их требовательностью к вычислительным ресурсам, интеграцию со “смежными программными средствами” (модели переноса РВ в атмосфере и грунтовых водах).

Авторами разрабатывается современный расчетно-прогностический комплекс (РПК) “Бакис”, который позволит учитывать наиболее существенные факторы, определяющие



Рис. 1. Схема РПК “Бакис”

миграцию РВ в водных объектах в районах расположения российских ОИАЭ (прежде всего, объектов ядерного наследия (ОЯН) и пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО)), для решения практических задач:

- проведения необходимых расчетов для обоснования радиационной и экологической безопасности ОИАЭ при штатной эксплуатации и в аварийных ситуациях, включая радиоэкологическое сопровождение проектов вывода указанных объектов из эксплуатации (в том числе энергоблоков АЭС);

- расчета допустимых сбросов РВ в водные объекты действующими и проектируемыми ОИАЭ;

- поддержки принятия решений по контрмерам в случаях сверхнормативного поступления радионуклидов в водные объекты, включая выработку необходимых рекомендаций о возможном ограничении водопользования;

- оценки средне- и долгосрочных последствий радиоактивного загрязнения водных объектов;

- расчетов трансграничного переноса радиоактивных веществ водными средами на территории сопредельных государств;

- анализа альтернативных проектов реабилитации объектов ядерного наследия;

- анализа альтернативных проектных вариантов и технологических схем сбросов вод, содержащих РВ, минимизирующих радиологические последствия таких сбросов.

На рис. 1 приведена блок-схема проектируемого РПК “Бакис”.

ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ РВ В ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Кроме прямого поступления радионуклидов в поверхностные воды со сбросами и утечками, одним из путей возможного загрязнения водных объектов являются выпадения РВ из атмосферы.

В настоящее время существуют компьютерные модели водных объектов, которые позволяют принимать исходные пространственно распределенные данные о выпадениях РВ из атмосферы. Среди отечественных программных средств можно указать аттестованное ПС “Сибилла” [1, 2] и гидрологический блок программно-технического комплекса [3, Приложения А и Б]. Указанные ПС позволяют принимать от моделей атмосферного переноса данные о плотности выпадений радионуклидов из атмосферы на акваторию и водосборы водных объектов, но они имеют существенные ограничения. Оба указанные ПС позволяют принимать данные только о разовых кратковременных выпадениях, в них отсутствует возможность приема информации о зависимости интенсивности выпадений от времени. Эта возможность позволяет учитывать только аварийные кратковременные выпадения, а возможность учета долгосрочных выпадений при штатном функционировании ОЯН с учетом розы ветров и изменяющейся интенсивности выбросов отсутствует. Также отсутствует возможность учета длительных (несколько суток и более) аварийных выбросов при меняющихся погодных условиях и интенсивности выброса (как это было, например, при аварии на Чернобыльской АЭС).

Поэтому требуется, чтобы разрабатываемый РПК “Бакис” мог принимать от компьютерных моделей атмосферного переноса в согласованном формате пространственно-временные поля интенсивности аэрозольных выпадений всех значимых, для водной радиоэкологии, радионуклидов.

На основании указанных данных, при помощи геоинформационных технологий путем определения “пересечения” следов радиоактивных выпадений с акваторией водных объектов и их водосборами требуется рассчитывать интенсивность поступления РВ в каждый водный объект (выделенную часть водного объекта) и на их водосборы¹.

¹ Авторам не известны программные средства, которые позволяют, при проведении расчетов распространения радионуклидов в водных объектах, полностью автоматически принимать информацию о загрязнении водосборов.

Существенным долговременным источником поступления РВ в водные объекты может быть вымывание долгоживущих радионуклидов с загрязненных в результате предыдущей деятельности ОЯН и ОИАЭ водосборных площадей (поймы, болота, островные системы рек).

Загрязнение водосбора может произойти и при выпадении из атмосферы (например, загрязнения водосборов произошли в результате аварии на Чернобыльской АЭС), и в результате штатных сбросов (например, Асановские болота и другие участки поймы р. Теча, Ольховское болото в зоне расположения Белоярской АЭС, островная пойма р. Енисей ниже г. Красноярска). После Кыштымской аварии и аварии на Чернобыльской АЭС были проведены исследования для оценки механизмов и параметров смыва дозообразующих радионуклидов с водосборов (например, [4]). Аналогичные исследования проводятся на территориях, загрязненных в результате аварии на АЭС “Фукусима-1” [5]. Следует отметить, что исчерпывающего ответа на данный вопрос в настоящее время не получено. Неопределенности при оценке параметров процесса смыва радионуклидов с водосборов по-прежнему высоки. Учитывая значимость такого поступления РВ в водные объекты, в разрабатываемый РПК “Бакис” смыв радионуклидов предполагается включить с параметрами, которые в настоящее время получены экспериментально.

Для обоснования безопасности ряда ОЯН, пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов и поверхностных водоемов — хранилищ жидких радиоактивных отходов, которые потенциально могут служить источниками радиоактивного загрязнения грунтовых вод, необходимо иметь возможность учитывать поступление радионуклидов в водные объекты с загрязненными подземными водами. Примером может служить проблема влияния фильтрационных вод из загрязненного водоема-охладителя Чернобыльской АЭС после катастрофы 1986 г. в р. Припять. В этой связи возникает необходимость реализации в РПК “Бакис” возможности принимать необходимые входные данные в зависимости от пространственных координат и времени от моделей переноса радиоактивной примеси с грунтовыми водами. В случае решения этой задачи РПК “Бакис” будет обладать значимой новизной, так как авторам не известны отечественные ПС, в которых учитываются взаимодействия такого рода моделей.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, СОБЫТИЯ, ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

Основные процессы, определяющие распространение и накопление радионуклидов в водных объектах, описаны многократно, например, в [6]. Это:

- адвективный перенос радиоактивности водными потоками;
- турбулентное, ветровое, приливное (для морских водных объектов) и иное перемешивание вод, приводящее к рассеиванию и разбавлению РВ;
- водообмен между различными водными объектами;
- вынос РВ за пределы объекта за счет проточности, фильтрации сквозь дно и борта водоема, технологического использования вод, испарения (для трития), за счет летучести (радиойод);
- процессы, определяющие перенос радионуклидов между водой и донными отложениями: сорбция и десорбция радионуклидов взвесями и донными отложениями, осаждение и взмучивание взвесей (включая подъем и перенос течением загрязненных донных отложений), диффузионный массообмен на границе “вода — дно”;
- процессы, определяющие миграцию радионуклидов в донных отложениях: осадконакопление, диффузионная миграция радионуклидов в слое донных отложений, биотурбация — “перемешивание” донных отложений за счет активности живых организмов;
- радиоактивный распад;

– образование и последующая миграция “дочерних”² радионуклидов.

Если возможности учета радиоактивного распада, адвективного переноса, турбулентного перемешивания и выноса радионуклидов за пределы водного объекта за счет точности присутствуют в том или ином объеме, с теми или иными ограничениями во многих “водных” компьютерных моделях (например, [1, 3, 7–10]), то возможность учета остальных процессов присутствует далеко не во всех ПС данного направления.

Сорбция и десорбция радионуклидов на взвесах, перенос между толщей воды и донными отложениями, вертикальная миграция в донных отложениях. Процессы сорбции и десорбции радионуклидов между водной массой и твердой фазой определяют перераспределение радиоактивной примеси между водой и абиотическими компонентами водной экосистемы. Вместе с тем, многие модели (например, [3]) не учитывают процессы сорбции и десорбции радионуклидов. В них не рассматривается перенос радионуклидов на взвесах, что ограничивает возможности их практического применения для РВ, имеющих тенденцию к сорбируемости на взвешенных частицах. На практике такие модели могут использоваться при проведении расчетов на короткие периоды времени, меньшие характерных времен сорбции, десорбции и осаждения взвесей на дно. Как следствие, ПС, основанные на моделях, не учитывающих сорбцию, не могут использоваться для расчета содержания РВ в донных отложениях – важном компоненте водного объекта, а также для расчета вторичного загрязнения воды от донных отложений.

Другие ПС (например, [7]) могут учитывать перенос РВ в растворе и на взвесах, но не учитывают процессы сорбции и десорбции (изменения фазового состояния радионуклидов в воде). Применимость таких моделей выше, но она ограничена, так как в реальности фазовое состояние РВ в водных объектах активно меняется, что существенно влияет на их распространение и накопление. Например, радиоцезий (^{134}Cs , ^{137}Cs), поступивший в пресноводный объект с атмосферными выпадениями, находится в растворенном состоянии, но за время от нескольких часов до нескольких суток в значительной степени сорбируется взвесями.

Существуют также ПС (например, [1]), которые обладают возможностью учета процессов сорбции и десорбции радионуклидов и их переноса на взвесах. В них для описания данных процессов принимается предположение о мгновенной равновесной и обратимой сорбции. Применимость таких ПС существенно шире, но в ряде случаев такое предположение может приводить к ошибкам в результатах расчетов. Например, в случае выпадения радиоцезия из атмосферы на реку, воды которой содержат значительное количество мелкодисперсных взвесей, данная модель будет давать результаты, в которых значительное количество нуклида выводится в донные отложения сразу после выпадений на участке, где были выпадения. В реальности сорбционное равновесие может наступить через несколько часов или суток, за которые радионуклиды в растворенном виде могут мигрировать на значительное расстояние вниз по течению реки.

Учет процессов вертикальной миграции радионуклидов в глубь донных отложений встречается редко в моделях миграции РВ в водных объектах [11, 12]. В то же время вертикальная миграция радионуклидов может существенно влиять на результаты расчетов, проводимых на длительные промежутки времени (годы и десятки лет). Поэтому учет процессов вертикальной миграции радионуклидов в глубь донных отложений в современных ПС желателен.

Влияние водной биоты на миграцию РВ. Большинство существующих в настоящее время моделей не учитывают влияние водной биоты на миграцию РВ в водных объектах. В ряде простых случаев это оправданно, так как обычно количество РВ, содержащихся в воде и донных отложениях, существенно превышает активность, накопленную биомассой. Но часто необходимо учитывать значительное влияние биоты на механизмы переноса

²Здесь и далее под “дочерними” понимаются не только радионуклиды, образующиеся непосредственно при распаде материнского, а любые радионуклиды “наследники”, которые образуются в результате цепочек радиоактивного распада.

активности между основными компонентами водного объекта. Такие задачи могут иметь большое практическое значение. Примером может служить реализация возможных проектов очистки загрязненных водоемов Теченского каскада за счет наполнения их водной биотой, эффективно аккумулирующей РВ.

Моделирование миграции “дочерних” радионуклидов. В большинстве моделей миграции и переноса радионуклидов в водных объектах моделируются только те радионуклиды, которые непосредственно поступили в водный объект от источника, то есть не учитывается образование внутри водного объекта дочерних радионуклидов, которые также могут формировать радиоактивное загрязнение воды, донных отложений, пойменных отложений, рыбы и сельскохозяйственных продуктов. Часто при расчете доз облучения населения влияние дочерних радионуклидов учитывается за счет дозовых коэффициентов (см. Приложение 4 к [13]), то есть при расчетах дозы от материнского радионуклида учитывается влияние дочернего радионуклида в предположении, что их удельные активности находятся в равновесии. Такой подход применяется для следующих комбинаций “материнский/дочерний” радионуклид: $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$, $^{235}\text{U}/^{231}\text{Th}$, $^{238}\text{U}/^{234}\text{Th}/^{234\text{m}}\text{Pa}$, $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Po}$.

Однако этот подход во многих случаях не применим, так как не выполняется основное предположение о равновесии между “материнским” и “дочерним” радионуклидами. Кроме того, такой подход не позволяет корректно рассчитывать содержание “дочернего” радионуклида в воде и донных отложениях. Так как при обосновании радиоэкологической безопасности ОИАЭ важным критерием является отсутствие превышения пороговых значений удельной активности в воде и донных отложениях водных объектов, относящих их к категории жидких и твердых радиоактивных отходов соответственно, то такая модель не в полной мере обеспечивает проведение необходимых расчетов для обоснования безопасности проектируемых объектов.

Учет иных факторов, событий, процессов и явлений, значимых при миграции РВ в водных объектах. Помимо указанных процессов миграции РВ, при моделировании переноса радионуклидов требуется учитывать характерные для водных объектов гидрологические фазы и явления, которые влияют на поступление РВ в водные объекты, их миграцию и накопление в них. В частности:

- ледовые явления могут существенно задерживать поступление в водный объект радионуклидов, связанное с выпадениями из атмосферы;
- таяние снегов и весенний паводок увеличивают смыв радионуклидов с водосбора, а за счет повышенного расхода воды в реках и повышенного содержания взвесей значительно усиливают миграцию РВ вдоль русел рек. За счет осаждения загрязненных взвесей паводки могут приводить к загрязнению речной поймы;
- неблагоприятные гидрометеорологические условия (штормовые явления) могут приводить к кратковременному многократному увеличению мутности воды за счет масштабного взмучивания донных отложений, что сказывается на увеличении удельной активности тех радионуклидов в воде, которым свойственно накопление в донных отложениях;
- градиенты плотности в водных объектах, вызванные градиентами температуры (в водных объектах с соленой водой еще и градиентами солености), могут существенно влиять на скорость и направление водных потоков. Наиболее ярким проявлением этих явлений является термоклин (скачок плотности по глубине), который может ограничить вертикальную миграцию радионуклидов в толще воды. Требуется учитывать процессы, которые могут приводить к нарушению указанных градиентов – осенний “переворот” термоклина в озерах, штормовые явления и др.;
- в крупных водных объектах направление и скорость ветров существенно влияют на скорость и направление водных потоков, а в морских водных объектах, в том числе бухтах, заливах, эстуариях значимым может быть влияние приливных явлений.

При проведении расчетов на длительные периоды времени в ПС необходимо заложить возможность учитывать изменения во времени большинства входных параметров. Например:

– в результате уменьшения сбросов от ФГУП “ПО “Маяк”, происходит изменение химического состава вод ТКВ (Теченского каскада водоемов) и, соответственно, изменение сорбционных характеристик радионуклидов [14];

– в результате изменения режима работы ОИАЭ могут изменяться такие параметры источника, как температура вод, режимы водозабора и водосброса и др.;

– русла рек и режим их течения изменяются в результате природных факторов (сезонная и межгодовая изменчивость водности) и в результате антропогенного воздействия (регулирование расхода воды и др.). Для многих российских рек существенная разница в расходе воды (более чем на порядок) между половодьем и в межень – обычное явление. Межгодовая изменчивость тоже может быть весьма велика – суммарный расход в маловодный год на многих реках может быть в несколько раз ниже, чем в год повышенной водности.

Аналогично, требуется возможность учета при расчетах не только изменения значений параметров во времени, но и их пространственной неоднородности.

Не существуют отечественные ПС, которые позволяли бы адекватно и эффективно учитывать все вышеуказанные факторы, процессы и явления.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБАТЫВАЕМОМУ ПС

В проведенных работах были сформированы функциональные требования к разрабатываемому ПС. Остановимся на некоторых из них.

В ПС должно быть обеспечено проведение расчетов для водных объектов любого масштаба, которые могут быть загрязнены в результате воздействия со стороны ОЯН и ПЗРО, при условии, что они относятся к одному из следующих типов:

- водоем (озеро, пруд, обводненный карьер, водохранилище);
- водоток (река, канал);
- поверхностное открытое хранилище жидких радиоактивных отходов;
- бухта (залив, лиман).

Разрабатываемое ПС должно позволять адекватно описывать источники поступления радионуклидов при нормальной эксплуатации ОЯН и ПЗРО и при возникновении аварийных ситуаций. Зависимость интенсивности источника поступления радионуклидов в водный объект от времени может быть произвольной. В настоящее время применимость некоторых существующих ПС ограничена либо аварийными (кратковременные или мгновенные), либо штатными (иногда только стационарными) источниками поступления активности.

ПС должно обеспечивать проведение расчетов и на близких расстояниях от ОИАЭ, и на большом удалении (в том числе для обеспечения оценок трансграничного переноса РВ на сопредельные территории иностранных государств). Кроме того, необходима возможность проведения расчетов на различные временные периоды, характерные для обоснования безопасности ОЯН и ПЗРО (в том числе длительные). Возможности многих ПС существенно ограничены в данном вопросе, так как применяемые в них модели имеют соответствующие ограничения.

Принимая во внимание то, что решаемые при обосновании безопасности ОЯН и ПЗРО задачи различаются сценариями развития событий, типами и характеристиками источников, сутью поставленных задач, детальностью доступных входных данных, в разрабатываемый ПС необходимо включить комплекс моделей различной размерности и степени детализации. Входящие в ПС модели будут различаться набором моделируемых процессов и способами их учета: камерные (в том числе многокамерные) модели, одно-, двух- и трехмерные модели.

Речные системы могут переносить РВ на сотни и тысячи километров. Один загрязненный водный объект может служить источником загрязнения других, поэтому важна возможность построения ПС таким образом, чтобы оно позволяло проводить как

параллельные, так и последовательные расчеты для водных систем — групп водных объектов, примерами которых могут быть:

- речные системы (включая сложные устья рек);
- река — водохранилище — река;
- река — эстуарий-залив — море;
- группа водоемов, соединенных протоками, каналами и др.;
- водоем — река.

В связи с тем, что возможны различные способы поступления РВ в водный объект, например, выпадение радионуклидов из атмосферы на акваторию, поступление с загрязненными грунтовыми водами, смыв с загрязненного водосбора, прямое поступление в водный объект (сбросы, утечки, поступление вод загрязненных притоков, поступление содержащих радионуклиды вод в результате различных аварийных ситуаций), ПС не должно накладывать существенных ограничений на пространственную конфигурацию источника. Требуется возможность учета поступления активности от следующих типов источников:

- точечные (например, сбросы сточных вод, мелкие притоки и пр.);
- площадные (например, выпадения из атмосферы на акваторию);
- линейные, вытянутые вдоль береговой линии (например, смыв с загрязненного водосбора);
- линейные, вытянутые вдоль открытой границы водного объекта (например, горло залива, устье крупной реки и пр.).

Мощность всех источников может быть функцией времени, а мощность площадных и линейных источников — функцией пространственных координат.

В связи с тем, что при расчетах (особенно для крупных водных объектов) детальные данные о пространственно-временном распределении скоростей и направлений водных потоков могут отсутствовать, а эта информация необходима для применения двух- и трехмерных моделей, в разрабатываемом РПК “Бакис” требуется включение гидродинамических моделей (двух- и трехмерных).

Большинство существующих отечественных ПС данного направления не имеют возможности проводить гидродинамические расчеты и полагаются на внешние данные. Исключением является компьютерная модель POMRad [15, 16].

Возможность применения комбинации различных моделей к одному водному объекту. При обосновании безопасности ОЯН и ПЗРО в ряде случаев требуется проведение расчетов на весьма длительные промежутки времени. Это ставит вопрос эффективного использования вычислительных ресурсов. Один из способов повышения эффективности — применение комбинации различных моделей к одному водному объекту. Например, при моделировании распространения активности, поступившей в водный объект в результате аварийной ситуации, применение конечно-разностных численных схем может вызывать проблемы, связанные с появлением нефизических явлений (например, слишком быстрого размывания загрязнения из-за конечного размера ячеек и численной дисперсии).

Модели, которые позволяют адекватно моделировать быстро протекающие процессы и правильно описывать наличие больших градиентов удельных активностей, могут быть более требовательны к вычислительным ресурсам, чем модели, описывающие протекание сравнительно медленных процессов в отсутствие больших градиентов удельных активностей. Для моделирования распространения РВ в условиях больших градиентов удельной активности часто применяются траекторные модели. Однако в таких моделях сложно учесть переход РВ между толщей воды и донными отложениями из-за того, что затруднительно моделировать процессы сорбции, десорбции и взмучивания взвесей при ограниченности вычислительных ресурсов и недостаточном числе пробных “частиц” в модели.

Решением данной проблемы может быть комбинированное применение различных численных моделей для одного водного объекта — одна применяется для моделирования

острой фазы, другая – для моделирования на последующий длительный промежуток времени.

Другим примером возможного комбинирования моделей является использование моделей различной размерности для одного водного объекта. Примером может служить р. Енисей, которая подвергалась радиоактивному загрязнению во время работы проточных реакторов ГХК [17–19]. Сбросные устройства ГХК расположены вблизи правого берега. Река Енисей ниже Красноярска имеет ширину 500–800 м и интенсивное течение. Поступающие в нее вблизи правого берега РВ распространялись в виде выраженного шлейфа. Оценки, проведенные по модели, приведенной в [20], показывают, что активность на оси шлейфа и средняя по руслу активность отличались более чем в два раза даже на расстоянии ~ 100 км.

Все потенциальные источники поступления радионуклидов от ГХК в р. Енисей находятся на правом берегу (в том числе полигон глубинного захоронения ЖРО “Северный”), то есть любые гипотетические сценарии возможного загрязнения р. Енисея от ГХК, кроме выбросов радионуклидов в атмосферу, предполагают поступление радионуклидов со стороны правого берега. Поэтому при моделировании переноса РВ вдоль русла реки предположение о равномерном загрязнении Енисея по ширине заведомо не выполняется, и для адекватного моделирования ближнего к ГХК участка реки требуется применение как минимум двумерных моделей до Казачинского порога (180 км ниже по течению). После Казачинского порога до впадения р. Ангары (250 км от ГХК) содержащиеся в воде РВ равномерно перемешаны по поперечному сечению и резонно использование одномерной модели переноса РВ. Впадение р. Ангары вновь сдвигает содержащиеся в водной массе РВ к левому берегу вплоть до Осиновских порогов (630 км ниже ГХК). На этом участке, как и на ближнем к ГХК, требуется использование двумерных моделей. После Осиновских порогов и практически до устьевых участков загрязнение русла р. Енисея можно считать равномерным по сечению реки и использовать более простые одномерные модели переноса РВ.

Расчет доз облучения от водопользования. При расчете дозы облучения населения программный код должен позволять учитывать все указанные в нормативных документах пути облучения [21–25].

Внутреннее облучение формируется за счет потребления загрязненной рыбы и питьевой воды; потребления мяса и молока скота, который использует загрязненную воду для водопоя и (или) выпасается на загрязненных пойменных и (или) орошаемых территориях; потребления растительной сельскохозяйственной продукции, выращиваемой на загрязненных пойменных и (или) орошаемых территориях; заглатывания воды при плавании; выноса радионуклидов с поверхности водных объектов: трития (в виде пара), ^{14}C (CO_2), летучих соединений изотопов йода, а также капельного выноса радионуклидов от брызгальных бассейнов и градилен, ингаляции от пыли при подъеме ветром при проведении пахотных и других работ на загрязненной пойме.

Внешнее облучение формируется за счет плавания (купания), пребывания на плавательных средствах (ловля рыбы), пребывания на берегу, пойменных и орошаемых территориях.

Поэтому одной из основных задач ПС “Бакис” является включение в рассмотрение расчета доз облучения всех перечисленных путей облучения населения от водопользования.

Кроме того, при расчете доз облучения населения от водопользования требуется:

- учитывать местные условия хозяйственного использования водных объектов и рационы питания, характерные для данной местности с учетом их возможных изменений во времени;

- обеспечивать расчеты для различных групп населения, различающихся по возрасту и (или) рациону, и (или) особенностям водопользования, для установления критической группы лиц из населения;

- учитывать динамику накопления РВ в рыбе и других продуктах питания;

– учитывать изменения удельной активности радионуклидов в воде и донных отложениях.

Авторам не известны ПС, которые позволяют проводить расчеты содержания РВ в компонентах водного объекта и на основании результатов расчета проводить оценку доз от водопользования с учетом всех указанных процессов и факторов.

Расчет допустимых сбросов РВ в водные объекты. В РПК “Бакис” предполагается включить расчетный модуль, позволяющий определять допустимые сбросы РВ в водные объекты. Основой для создания модуля будут действующие на момент разработки нормативные документы. В настоящее время предполагается использование следующих источников [13, 21–27].

Оценка воздействия на объекты природной среды. В соответствии с общемировыми тенденциями, при решении задач радиационной безопасности водных экосистем должны учитываться как радиологические (для человека), так и радиоэкологические (для радиочувствительных объектов водной биоты) аспекты безопасности. Предполагается, что основой для создания расчетного модуля будет единственная в России утвержденная методика оценки воздействия РВ на водную биоту [28], разработанная на основании [13, 22, 26, 29–31].

Технические функциональные требования. Кроме стандартных технических требований (дружественный интерфейс, отказоустойчивость) необходимо определить задачи, которые должны быть решены при разработке рассматриваемого ПС, чтобы оно могло эффективно использоваться. ПС должно быть обеспечено базой данных, не привязанных к специфике конкретных объектов, но с учетом общей специфики ОЯН и ПЗРО. Эта база данных должна быть наполнена константным обеспечением, необходимым для определения входных параметров используемых моделей. Первый этап разработки базы завершен [32].

Также должна быть обеспечена возможность последующей коррекции этих данных и предусмотрен двухэтапный ввод исходных данных. На первом (“подготовительном”) этапе осуществляется ввод исходных данных, учитывающих местные условия, то есть тех данных, которые могут быть введены в систему до того, как стали известны сценарий, конкретные характеристики источника поступления активности и значения других параметров, различающиеся у различных практических задач для рассматриваемого объекта:

– данные о водных объектах (гидрологические и морфометрические характеристики, преобладающий характер донных отложений и их гранулометрический состав, характерные размеры взвесей, географические координаты);

– данные о водообмене между водными объектами;

– данные о водосборах;

– миграционные характеристики радионуклидов в рассматриваемом водном объекте;

– основные параметры жизнедеятельности населения при водопользовании;

– границы расчетной области.

На втором этапе (непосредственно перед выполнением расчета) вводятся параметры, не определенные на предыдущих этапах: характеризующие сценарий расчета, характеристики источника, параметры управления расчетом.

Для определения мощности пространственно распределенных источников (атмосферные выпадения, поступления с грунтовыми водами) требуется применение геоинформационных технологий.

Это не единственное планируемое применение этих технологий в разрабатываемом ПС. Использование электронных карт в ряде случаев делает гораздо более удобным задание пространственно распределенных входных данных, а просмотр результатов расчетов на карте в виде контуров (изолиний) разных цветов – один из удобных способов визуального анализа ситуации в регионе расположения ОЯН или ПЗРО.

Для детального анализа результатов расчетов требуются также другие способы отображения результатов расчета – графики и электронные таблицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разрабатываемый РПК “Бакис” предполагается включить комплекс математических моделей, предназначенных для решения водных радиоэкологических задач при различных режимах эксплуатации ОИАЭ. Данное ПС должно объединять модели различной сложности, отличающиеся как по набору моделируемых процессов и способу их учета, так и по методам поиска решения. Это позволит выбирать модель, наиболее подходящую для решения поставленной задачи. Для повышения эффективности моделирования РПК “Бакис” должен обеспечить возможность применять разные модели для одного и того же водного объекта. Важная задача, стоящая перед разработчиками – комплексное (совместное) моделирование водных систем, так как водные объекты, объединенные в водную систему, способны оказывать существенное взаимное влияние.

Помимо основного набора моделей, в данный РПК планируется включить ряд вспомогательных моделей, которые будут решать задачи параметризации (определения необходимых значений параметров модели) и оценки поступления радиоактивности от источников различных типов по различным путям в водные объекты.

Основой пользовательского интерфейса РПК “Бакис” (ввод пространственно распределенных исходных данных, отображения результатов расчета) будет геоинформационная система, она будет использоваться для части модельных расчетов.

При оценках радиоэкологического воздействия ОЯН, ПЗРО и ОИАЭ на водные экосистемы РПК “Бакис” будет использовать нормативную методику [28], а расчет дозы облучения населения будет производиться с учетом всех значимых путей облучения, связанных с водопользованием, и рекомендаций [25].

Важным звеном разрабатываемого РПК для охраны окружающей водной среды от сбросов РВ будет включение в комплекс моделей модуля, позволяющего рассчитывать допустимые сбросы РВ в водные объекты в соответствии с утвержденными действующими нормативными документами. Включение такого модуля позволит РПК решать необходимые в отрасли производственные задачи и задачи, стоящие перед проектировщиками при создании необходимой проектной документации проектируемых ОИАЭ в России и за рубежом.

Создание РПК “Бакис” будет производиться поэтапно. На первом этапе было разработано техническое задание, оно включает:

- функциональные и иные требования к разрабатываемому программному обеспечению;
- общую архитектуру разрабатываемого РПК;
- формулировку базовых математических моделей, которые будут основой создаваемого РПК;
- основные принципы взаимодействия с моделями атмосферного переноса и переноса радионуклидов с грунтовыми водами;
- проект пользовательского интерфейса РПК “Бакис”;
- проект структуры баз данных, включая базу знаний.

Была заполнена база данных РПК “Бакис”, включающая константное обеспечение, “типичные” значения используемых моделями коэффициентов и параметров и др. [32].

На последующих этапах работы планируется провести собственно разработку РПК “Бакис”, его тестирование и верификацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верификационный отчет ИБРАЭ РАН. Расчетный код Сибилла. 2014.
2. *Krylov A., Nossov A., Kazakov S.* SIBYLLA CODE: ASSESSMENT OF WATER BODIES CONTAMINATION AND DOSES RECEIVED BY POPULATION DUE TO

RADIOACTIVITY DISCHARGES INTO THE HYDROSPHERE // Proc. Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development. 26–29 June 2017, Yekaterinburg, Russian Federation, IAEA.

3. РД 52.18.719-2009. Методика оперативной оценки загрязнения водотоков и водоемов аварийными выбросами загрязняющих веществ в атмосферу / ВНИИГМИ-МЦД, 2009. С. 53.
4. Борзилов В.А., Седунов Ю.С., Возженников О.И. и др. Физико-математическое моделирование процессов, определяющих смыв долгоживущих радионуклидов с водосборов тридцатикилометровой зоны Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. 1989. № 1. С. 5–13.
5. Коноплев А.В. Сравнительный анализ смыва радиоцезия с загрязненных водосборов в результате аварий на АЭС Фукусима-1 и Чернобыльской АЭС. М.: Геохимия, 2016. С. 1–7.
6. Носов А.В., Крылов А.Л., Киселев В.П., Казаков С.В. Моделирование миграции радионуклидов в поверхностных водах / Под ред. Р.В. Арутюняна. М.: Наука, 2010. 253 с.
7. A Primer for ECOMSED. Version 1.3. Users Manual. Mahwah, N.J., USA: HydroQual, Inc. 2002. 188 с.
8. Zheleznyak M, Demchenko R, Khursin S, Kuzmenko Y, Tkalich P, Vituk N. Mathematical modelling of radionuclide dispersion in the Pripyat–Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident // Science of Total Environment. 1992. V. 112. P. 89–114.
9. Boyer P., Beaugelin-Seiller K., Ternat F., Anselmet F., Amielh M. A dynamic box model to predict the radionuclide behaviour in rivers for medium and long term periods // Radioprotection, Volume 40, 2005.
10. Monte L. A generic model for assessing the effects of countermeasures to reduce the radionuclide contamination levels in abiotic components of fresh water systems and complex catchments. Environ Model Softw. 2001. V. 16. P. 669–690.
11. Кононович А.Л., Носов А.В. Продольный перенос вредных примесей речным потоком // Атомная энергия. Т. 90. Вып.1. 2001. С. 35–38.
12. Скотникова О.Г., Константинов И.Е., Фесенко С.В. Исследование вертикальной миграции радионуклидов в донных отложениях и грунте непроточного водоема / Препринт ГК ИАЭ СССР и НКРЗ при Минздраве СССР. М.: 1983. 11 с.
13. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
14. Болдырев К.А., Уткин С.С., Казаков С.В. и др. Возможности геохимического моделирования значений коэффициентов распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs для Теченского каскада водоёмов ФГУП “ПО “Маяк” // Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 1.
15. Крылов А.Л., Носов А.В., Киселев В.П. Использование комплекса моделей POMRad для моделирования распространения радиоактивных веществ в морской среде после аварии на АЭС “Фукусима-1” // Труды ИБРАЭ РАН. М.: Наука, 2013. С. 196–213.
16. Крылов А.Л., Носов А.В., Киселев В.П. Моделирование миграции радиоактивных веществ в сложных и неоднородных водных объектах при помощи комплекса моделей POMRad // Москва, Метеорология и гидрология. 2014. № 1. С. 48–59.
17. Носов А.В. Оценка источника поступления радиоактивных веществ в реку по данным измерения загрязнения донных отложений // Атомная энергия. 2005. Т. 99. Вып. 3. С. 221–228.
18. Крышев Н.И., Драголюбова И.В., Бурков А.И. Моделирование эколого-геофизических процессов миграции радионуклидов на водосборах регионов АЭС // Гидрометеорология. Сер. 87. Мониторинг состояния окружающей среды, Обзорная информация. Обнинск: Государственный комитет СССР по Гидрометеорологии, Всесоюзный НИИ Гидрометеорологической информации – мировой центр данных. 1990. Вып. 1.

19. *Носов А. В.* Прогноз и оперативный контроль радиационной обстановки и микроклимата в районе расположения предприятий ЯТЦ: Дис. д-ра физ.-мат. наук: 25.00.30. Москва, 2005. 236 с. РГБ ОД, 71:06-1/151.
20. Safety report series N19. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Vienna. IAEA. 2001.
21. Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. М: МХО ИНТЕРАТОМЭНЕРГО, 1992.
22. ICRP – International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Annals ICRP 37(2–4). Elsevier, Amsterdam, 2007.
23. Безопасность в атомной энергетике. Общие положения безопасности АЭС. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения. Ч. 1. МХО “Интератомэнерго”. М.: Энергоатомиздат, 1984.
24. Методика разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты для водопользователей. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 декабря 2016 г. № 551.
25. РБ-126-17. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии “Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты”. Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.07.2017 г. № 281.
26. UN – United Nations. Effects of radiation on the environment // UNSCEAR2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. V. II. Scientific Annex E. Effect of Ionizing Radiation on Non-human Biota. United Nations, New York, 2011. 164 p.
27. СП 2.6.1.2612-10. “Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010”.
28. Р 52.18.820-2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Росгидромет, 2015.
29. IAEA Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards Series No. GSR Part 3, Vienna, 2014.
30. Основные принципы оценки воздействия ионизирующих излучений на живые организмы, за исключением человека. Публикация 91 МКРЗ. М.: Изд-во “Комтехпринт”, 2004. 76 с.
31. Федеральный закон № 7-ФЗ “Об охране окружающей среды”.
32. РИД “База данных расчетно-программного комплекса моделирования переноса радиоактивных примесей в водных объектах суши. Версия 2017.01”.

УДК 536.2

ЗАДАЧА ДЫХНЕ ДЛЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА

© 2018 г. И.Л. ДРАНИКОВ

Институт Проблем Безопасного Развития Атомной Энергетики РАН, Москва, Россия

E-mail: dranikov@mail.ru

Рассмотрена задача Дыхне для распространения тепла в высокопроницаемой трещине, окруженной слабопроницаемой матрицей. Установлено, что, как и в случае обычной задачи Дыхне, имеется субдиффузионный режим распространения.

Ключевые слова: задача Дыхне, тепло, трещина, аномальная диффузия.

DYKHNE PROBLEM FOR HEAT

I.L. DRANIKOV

Nuclear Safety Institute, Moscow, Russia

E-mail: dranikov@mail.ru

Dykhne problem for heat proliferation in a fracture is considered. The fracture is highly heat-conducting, while the surrounding is slowly heat-conducting. Like for the usual Dykhne problem, a subdiffusive regime is found to exist.

Keywords: Dykhne problem, heat, fracture, anomalous diffusion.

В связи с проблемой захоронения радиоактивных отходов атомной энергетики исследуется [1–12] задача о диффузии в трещине, окруженной слабопроницаемой матрицей, предложенная А.М. Дыхне [1–3]. Задача связана с аномальной диффузией в широком диапазоне времен, если характеристики сред сильно различаются. В настоящей работе предложен вариант постановки задачи Дыхне с распространением тепла. Постановка такова. Имеется бесконечный плоскопараллельный слой малой толщины a , характеризующийся высокой теплопроводностью X , он окружен неограниченной матрицей с низкой теплопроводностью χ , так что $\chi \ll X$. Начало координат расположено в середине слоя, причем плоскость $x-y$ параллельна его границам. В начальный момент времени в начале координат включается источник тепла мощностью Q он остается включенным все остальное время. Вначале система была абсолютно холодной (это условие необходимо для конечности дисперсии распределения тепла в слое; оно не ограничивает общность задачи, так как в другом случае можно было бы вычесть из профиля равномерный фон температуры в силу линейности). Требуется найти дисперсию распределения температуры в слое, которую определим выражением:

$$\sigma(t) \equiv \langle \vec{r}_t^2 \rangle = \left(\int_{(\text{слой})} d^3\vec{r} T(\vec{r}, t) \right)^{-1} \int_{(\text{слой})} d^3\vec{r} |\vec{r}_t|^2 T(\vec{r}, t). \quad (1)$$

Здесь T – температура; \vec{r}_t – двухмерный радиус-вектор, то есть проекция радиус-вектора на плоскость $x-y$.

Эволюция распределения температуры определяется уравнениями

$$\frac{\partial T}{\partial t} - X\Delta T = Q\delta(\vec{r})\theta(t), \quad |z| \leq a/2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \chi\Delta T = 0, \quad |z| > a/2, \quad (3)$$

где $\theta(t)$ – функция Хевисайда. На временах $t \gg t_0 \equiv a^2/4X$ в слое устанавливается равномерное распределение тепла по оси z . После интегрирования (2) по z и перехода в представление Фурье–Лапласа получим:

$$T_{\vec{k},p}(p + Xk^2) + \frac{\tau_{\vec{k},p}}{a} = \frac{2\pi Q}{p}, \quad (4)$$

где \vec{k} – волновой вектор в плоскости $x-y$; $\tau_{\vec{k},p}$ – компонента потока на границе, которую, решая уравнение (3) как

$$\left(p + \chi k^2 - \chi \frac{d^2}{dz^2} \right) T_{\vec{k},p}(z) = 0, \quad (5)$$

легко связать с компонентой самой температуры на границе (и в слое):

$$\tau_{\vec{k},p} = -2\chi \frac{\partial}{\partial z} \left(T_{\vec{k},p} \exp \left\{ -|z| \sqrt{k^2 + p/\chi} \right\} \right)_{z=0} = 2\chi T_{\vec{k},p} \sqrt{k^2 + \frac{p}{\chi}}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (4), получим:

$$T_{\vec{k}p} = \frac{2\pi Q/p}{p + Xk^2 + \sqrt{\frac{p + \chi k^2}{t_1}}}, \quad (7)$$

где $t_1 = \frac{a^2}{4\chi}$.

В отличие от задачи Дыхне для диффузии в соответствующем выражении видна дополнительная переменная Лапласа в знаменателе. Тогда наша задача будет найти дисперсию (1), которая в представлении Фурье–Лапласа вычисляется по формуле:

$$\sigma(t) = - \left[\int_{p^* - i\infty}^{p^* + i\infty} \frac{dp}{2\pi i} c_{0p} \right]^{-1} \int_{p^* - i\infty}^{p^* + i\infty} \frac{dp}{2\pi i} \nabla_{\vec{k}}^2 c_{\vec{k}p} \Big|_{\vec{k}=0}, \quad \text{Re } p^* > 0. \quad (8)$$

Асимптотический результат вычисления при $t \gg t_1$ имеет вид:

$$\sigma(t) = \frac{\Gamma(3/2)}{\Gamma(5/2)} \chi t + 2X\Gamma(3/2)\sqrt{tt_1} = \frac{2}{3}\chi t + X\sqrt{\pi t t_1}. \quad (9)$$

Это качественно (с точностью до коэффициентов) совпадает с результатом решения задачи с диффузией. Очевидно, что по-прежнему имеется «субдиффузионный» режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дыхне А. М., Драников И. Л., Кондратенко П. С., Попов А. В. Субдиффузия в кусочно-однородной среде // Изв. РАН. Энергетика. 2004. № 4. С. 123–126.

2. *Dykhne A.M., Dranikov I.L., Kondratenko P.S.* Anomalous diffusion in regularly non-uniform media // *J. of Hydraulic Research*. 2005. V. 43. № 2.
3. *Dykhne Alexander, Dranikov Ilya, Kondratenko Peter, Matveev Leonid.* Transport regimes and concentration tails for classical diffusion in heterogeneous media with sharply contrasting properties // *Vadose Zone J.* 2008. V. 7. № 4. P. 1145–1151.
4. *Кондратенко П.С., Матвеев Л.В.* Режимы переноса и хвосты концентрации в регулярно-неоднородных сильно контрастных средах // *Труды ИБРАЭ*. 2008. Вып. 7. С. 79–91.
5. *Матвеев Л.В.* Перенос примеси в модели двупористой регулярно-неоднородной среды при наличии коллоидов // *ЖЭТФ*. 2009. V. 135. № 6. P. 1200–1206.
6. *Дворецкая О.А., Кондратенко П.С., Матвеев Л.В.* Аномальная диффузия в обобщенной модели Дыхне, *ЖЭТФ*. 2010. V. 137. № 1. С. 67–76.
7. *Головизнин В.М., Кондратенко П.С., Матвеев Л.В., Короткин И.А., Драников И.Л.* Аномальная диффузия радионуклидов в сильнонеоднородных геологических формациях. М.: Наука, 2010. 342 с.
8. *Большов Л.А., Дворецкая О.А., Кондратенко П.С., Матвеев Л.В.* Аномальные режимы переноса примеси в регулярно-неоднородных резкоконтрастных средах. Фундаментальные проблемы моделирования турбулентных и двухфазных течений. Т. 3. М.: Комтехпринт, 2012. С. 242–292.
9. *Драников И.Л.* Аномальная диффузия в регулярных трещиноватых средах // Сб. III научн. конф. стипендиатов ИБРАЭ РАН: 18–19 апреля 2002 г. М.: ИБРАЭ, 2002.
10. *Драников И.Л.* Аномальная диффузия в простых физических моделях: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2007.
11. *Матвеев Л.В.* Неклассические процессы переноса в сильно неоднородных средах: Дис. ... док. физ.-мат. наук. М., 2016.
12. *Dvoretzkaya O.A., Kondratenko P.S.* Transport phenomena in sharply contrasting media with a diffusion barrier // *J. Phys. A: Math. Theor.* 2011. V. 44. P. 465001.

УДК 593.3

**ТЕРМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ МАССИВНОГО ТЕЛА НА ТЕПЛОВОЙ УДАР
НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ТИПА**© 2018 г. Э.М. КАРТАШОВ¹, Е.В. НЕНАХОВ²¹*Московский технологический университет (МИТХТ), Москва, Россия*²*Московский авиационный институт (НИУ МАИ), Москва, Россия*

E-mail: kartashov@mitht.ru

Развита теория динамической термоупругости в проблеме теплового удара на основе феноменологии Максвелла–Каттанео–Лыкова–Вернотта о конечной скорости распространения теплоты в твердых телах. Предложено уравнение совместности в напряжениях, обобщающее соотношение Бельтрами–Митчелла на динамические задачи и как частный случай исследована термическая реакция массивного твердого тела на тепловой удар. Изучены различные режимы внезапного нагрева границы тела: температурный, тепловой, средой. Выявлен наиболее опасный режим теплового воздействия; рассчитаны скачки напряжений на фронте термоупругой волны – соотношения, имеющие практическое значение при оценке термической прочности твердых тел в условиях теплового удара.

Ключевые слова: тепловой удар; конечная скорость распространения теплоты; динамические термоупругие напряжения; скачки напряжений.

**THERMAL RESPONSE OF A MASSIVE BODY TO HEAT STROKE
ON THE BASIS OF THE HYPERBOLIC TYPE EQUATIONS**E.M. KARTASHOV¹, E.V. NENAKHOV²¹*Moscow Technological University (MITHT),*²*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

E-mail: kartashov@mitht.ru

The theory of dynamic thermoelasticity in the problem of thermal shock is developed on the basis of Maxwell–Cattaneo–Lykov–Vernot phenomenology on the finite velocity of heat propagation in solids. A compatibility equation in stresses is proposed that generalizes the Beltrami–Mitchell relation to dynamic problems and as a special case of the investigational thermal reaction of a massive solid body to a non-thermal shock. Different modes of sudden training of the body spray were studied: temperature, thermal, environment. The most dangerous mode of thermal influence is revealed; stress jumps at the front of a thermoelastic wave are calculated, as ratios that have great practical importance in the evaluation of thermal strength of solid body under thermal shock conditions.

Keywords: heat stroke; the final velocity of heat propagation; dynamic thermoelastic stresses; stress jumps.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов теплового разрушения твердых тел в результате их взаимодействия с интенсивными потоками связано с решением проблемы термической прочности материалов, актуальность которой возросла в последнее десятилетие в связи с созданием мощных излучателей энергии и их использованием в технологических процессах. Плазмохимическая обработка материалов, обработка материалов в инфракрасных печах и гелиоустановках сопровождается их быстрым нагревом. Новые технологические приемы, применяемые в машиностроении и близких к нему областях, основаны на интенсивном нагреве материалов плазменными потоками, лазерными или электронными лучами. Мощные радиационные излучатели используются для термической закалки и упрочнения поверхности изделий. Интенсивному тепловому воздействию подвергаются поверхности авиационно-космических аппаратов и пусковых установок.

Существует значительное количество публикаций, описывающих проблему теплового удара при резком нагреве материалов. Изучены физические закономерности термонапряженного состояния в изотропных и анизотропных упругих телах на основе классической феноменологии Фурье и с учетом конечной скорости распространения теплоты в твердых телах; развита обобщенная теория сопряжения термомеханических полей с полями различной физической природы (электрических, магнитных); сформулированы определяющие соотношения линеаризованной теории с учетом тепловой памяти; установлена связь макроскопического поведения сплошной среды с внутренними параметрами состояния среды и скоростью их изменения во времени. Систематизация результатов в этой области термомеханики сделана в книгах [1–4].

Настоящая публикация продолжает исследования в этой области. Изучается термическая реакция твердого тела на тепловой удар на основе уравнения теплопроводности гиперболического типа, вытекающего из обобщенного закона теплопроводности Максвелла–Каттанео–Лыкова–Вернотта (подробности в [5]), учитывающего инерцию теплового потока. Принимаются во внимание два обстоятельства.

При высокоинтенсивном нагреве твердых тел, создающем тепловой удар, тепловые потоки $\vec{q}(M, t)$ в области $\Omega = \{M(x, y, z) \in D, t > 0\}$, описывающей реальное твердое тело, отстают от градиента температуры $T(M, t)$ на величину, пропорциональную времени релаксации τ_r , связанную со скоростью распространения v_T теплоты соотношением $v_T = \sqrt{\alpha / \tau_r}$ (α – теплопроводность):

$$\vec{q}(M, t) = -\lambda_T \text{grad} T(M, t) - \tau_r \frac{\partial^2 \vec{q}(M, t)}{\partial t} \quad (\lambda_T - \text{теплопроводность}). \quad (1)$$

Уравнение энергии для изотропных твердых тел $\text{ср} \partial T(M, t) / \partial t = \text{div} \vec{q}(M, t)$ приводит к уравнению переноса гиперболического типа:

$$\frac{\partial T(M, t)}{\partial t} = a \Delta T(M, t) - \tau_r \frac{\partial^2 T(M, t)}{\partial t^2}, \quad (2)$$

содержащего первую и вторую производные от температуры по времени. Вследствие этого уравнение (2) описывает волновые процессы, в данном случае волновой теплоперенос.

Второе обстоятельство состоит в том, что вопросы корректной постановки краевых задач для уравнения (2) рассмотрены в последние годы [1;5] и ряд вопросов, связанных с тепловыми задачами для уравнения (2), до конца не изучены.

Уравнение совместности в напряжениях для динамических задач

Пусть D – конечная или частично ограниченная выпуклая область пространства $M(x, y, z)$, находящаяся в условиях термонапряженного состояния; S – кусочно-гладкая поверхность, ограничивающая область D , \vec{n} – внешняя нормаль к S ;

$T(M, t)$ – распределение температуры в области D при $t > 0$; T_0 – начальная температура, при которой область D находится в недеформируемом состоянии.

Пусть $\sigma_{ij}(M, t)$, $\varepsilon_{ij}(M, t)$, $U_i(M, t)$ ($i, j = x, y, z$) – соответственно компоненты тензоров напряжения, деформации и вектора перемещения, удовлетворяющие основным уравнениям (несвязанной) термоупругости [1]: уравнениям движения (с учетом объемных сил $F_i(M, t)$), геометрическим соотношениям и физическим уравнениям (в индексных обозначениях):

$$\sigma_{ij}(M, t) + F_i(M, t) = \rho U_{i,j}(M, t); \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij}(M, t) = \left(\frac{1}{2}\right)[U_{i,j}(M, t) + U_{j,i}(M, t)]; \quad (4)$$

$$\sigma_{ij}(M, t) = 2\mu\varepsilon_{ij}(M, t) + [\lambda\varepsilon_{ii}(M, t)] - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T(T(M, t) - T_0)\delta_{ij}; \quad (5)$$

$$M \in D, t > 0,$$

где ρ – плотность; $\mu = G$, $\lambda = 2G\nu / (1 - 2\nu)$ – изотермические коэффициенты Ламе; ν – коэффициент Пуассона, при этом $2G(1 + \nu) = E$; E – модуль Юнга; G – модуль сдвига; α_T – коэффициент линейного теплового расширения; δ_{ij} – символ Кронекера; $\bar{\varepsilon}(M, t) = U_{i,j}(M, t) = \varepsilon_{ij}(M, t)$ – объемная деформация, связанная с суммой нормальных напряжений $\bar{\sigma}(M, t) = \sigma_{nn}(M, t)$ ($n = x, y, z$) соотношением

$$\bar{\varepsilon}(M, t) = \frac{1 - 2\nu}{E}\bar{\sigma}(M, t) + 3\alpha_T[T(M, t) - T_0]. \quad (6)$$

Исключая в (4) компоненты вектора перемещения, приходим к известному уравнению совместности деформаций в виде $\gamma_{pmj}\gamma_{qni}\varepsilon_{ij}(M, t) = 0$, где γ_{ijk} – альтернативный (антисимметричный) тензор ($p, q, m, n = x, y, z$). Это уравнение можно записать подробнее:

$$\varepsilon_{ij,mn} - \varepsilon_{im,jn} - \varepsilon_{nj,mi} + \varepsilon_{mn,ji} = 0. \quad (7)$$

Выразим из (5) деформации через напряжения

$$\varepsilon_{ij}(M, t) = \frac{1 + \nu}{E}\sigma_{ij}(M, t) - \frac{\nu}{E}\sigma_{nn}(M, t)\delta_{ij} + \alpha_T[T(M, t) - T_0]\delta_{ij}, \quad (8)$$

Свернем в (7) в тензоры по индексам $m = n$: $\varepsilon_{ij,nn} - \varepsilon_{in,jn} - \varepsilon_{nj,ni} + \varepsilon_{nn,ji} = 0$ и подставим правые части соотношения (8). Произведя преобразования с использованием (3), (4) и свойств тензорной алгебры, найдем следующее основное уравнение динамической термоупругости в напряжениях

$$\begin{aligned} & (1 + \nu)\sigma_{ij,nn}(M, t) + \sigma_{nn,ji}(M, t) + \frac{\nu(1 + \nu)}{(1 - \nu)}F_{n,n}(M, t)\delta_{ij} + \\ & + (1 + \nu)[F_{i,j}(M, t) + F_{j,i}(M, t)] + \\ & + E\alpha_T\left[\frac{1 + \nu}{1 - \nu}(T(M, t) - T_0)_{nn}\sigma_{ij} + (T(M, t) - T_0)_{ij}\right] = \\ & = \frac{(1 + \nu)}{2G}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left[2\sigma_{ij}(M, t) - \frac{\nu}{1 - \nu^2}\sigma_{nn}(M, t)\delta_{ij} + \frac{2G(2 + \nu)}{1 - \nu}\alpha_T(T(M, t) - T_0)\delta_{ij}\right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$M \in D, t > 0,$$

в координатной форме (x, y, z):

$$(1 + \nu)\Delta\sigma_{ij}(M, t) + \frac{\nu(1 + \nu)}{(1 - \nu)}\operatorname{div}\vec{F}(M, t)\delta_{ij} + \quad (10)$$

$$+ (1 + \nu)\left[F_{i,j}(M, t) + F_{j,i}(M, t)\right] + E\alpha_T\left[\frac{1 + \nu}{1 - \nu}\Delta T(M, t)\delta_{ij} + (T(M, t) - T_0)_{ij}\right] =$$

$$= \frac{\rho(1 + \nu)}{2G}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left[2\sigma_{ij}(M, t) - \frac{\nu}{1 - \nu^2}\sigma(M, t)\delta_{ij} + \frac{2G(2 + \nu)}{1 - \nu}\alpha_T(T(M, t) - T_0)\delta_{ij}\right],$$

$M \in G, t > 0$.

Здесь $i, j = x, y, z$; $M = M(x, y, z)$; $\sigma = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$;

$$\vec{F} = \{F_x, F_y, F_z\}; \operatorname{div}\vec{F} = F_{n,n} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}.$$

Выражение (10) является обобщением уравнений Бельтрами–Митчелла на динамические задачи. Этот случай впервые рассмотрел В. Новацкий [6], используя уравнения эластокинетики в напряжениях, однако конечный результат в [6] имеет форму, отличную от (10) и менее удобную для практических приложений. То есть уравнение (10) представляет самостоятельный интерес для термомеханики. Частный случай уравнения (10) для квазистатических задач (в (3) следует считать $\rho = 0$) указан в [1], а при отсутствии объемных сил ($F_i = 0$ квазистатика) – в [6]. В конкретных случаях теплового удара (характер нагрева; область термонапряженного состояния; случай симметрии) соотношение (10) приводит к известным выражениям динамической термоупругости [1].

Представляется интересным получить аналогичное соотношение и для плоской задачи термоупругости. Для этого случая в (3), (4) примем индексы $i, j = x, y$, а соотношение (8) следует записать в виде:

$$\varepsilon_{ij}(M, t) = \frac{1 + \nu_1}{\nu_1}\sigma_{ij}(M, t) - \frac{\nu_1}{E_1}\sigma_{nn}(M, t)\delta_{ij} + \alpha_{T_1}[T(M, t) - T_0]\delta_{ij}, \quad (11)$$

где $M = M(x, y)$, параметры в (11) следующие:

– для плоской деформации:

$$\nu_1 = \frac{\nu}{1 - \nu}; E_1 = \frac{E}{1 - \nu^2}; \alpha_{T_1} = \alpha_T(1 + \nu);$$

– для плосконапряженного состояния:

$$\nu_1 = \nu; E_1 = E; \alpha_{T_1} = \alpha_T.$$

Уравнение совместности в деформациях (7) вырождается и имеет вид:

$$\varepsilon_{ij,nn}(M, t) = \varepsilon_{in,in}(M, t).$$

Повторяя предыдущие рассуждения, приходим к конечному результату:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{i,j}(M, t) + (1 + \nu_1)F_{n,n}(M, t) + E_1\alpha_{T_1}[T(M, t) - T_0]_{nn} = \\ = \frac{\rho(1 + \nu_1)}{E_1}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left[(1 - \nu_1)\sigma(M, t) + 2\alpha_{T_1}(T(M, t) - T_0)\right] \end{aligned} \quad (12)$$

Динамическая реакция твердого тела на тепловой удар

Рассмотрим случай применения соотношения (10), имеющий значение для многих практических приложений [7]. Упругое полупространство $z \geq 0$, первоначально находящееся при температуре T_0 , подвергается на границе различным режимам

теплового воздействия, создающим тепловой удар, а именно: температурному нагреву температурой T_c (температурная функция $T_1(z,t)$), либо тепловому нагреву тепловым потоком q_0 (температурная функция $T_2(z,t)$), либо нагреву средой температуры T_c (температурная функция $T_3(z,t)$). В этих условиях при одномерном движении величины $U_x = U_y = 0$; $U_z = U_z(z,t)$; $\varepsilon_{zx} = \varepsilon_{zy} = \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = 0$; $\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{zz}(z,t)$; напряжения $\sigma_{ij} = 0$ для $i \neq j$ и $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(z,t)$ для $i = j$. Уравнение (10) при отсутствии объемных сил и для свободной от напряжений границы тела приводит к следующей динамической задаче термоупругости:

$$\frac{\partial^2 \sigma_{zz}}{\partial z^2} - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 \sigma_{zz}}{\partial t^2} = \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \alpha_T \rho \frac{\partial^2 T_i(z,t)}{\partial t^2}, \quad z > 0, \quad t > 0, \quad (i = 1,2,3); \quad (13)$$

$$\sigma_{zz} |_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \quad z \geq 0; \quad (14)$$

$$\sigma_{zz}(z,t) |_{z=l} = \sigma_{zz}(z,t) |_{z=\infty} = 0, \quad t > 0, \quad (15)$$

где

$$v_p = \sqrt{\frac{2G(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}} = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} \quad (16)$$

– скорость распространения волны расширения в упругой среде, близкая к скорости звука. Остальные компоненты тензора напряжения, отличные от нуля, согласно (3)–(5) имеют вид:

$$\sigma_{xx}(z,t) = \sigma_{yy}(z,t) = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{zz}(z,t) - \frac{E\alpha_T [T_i(z,t) - T_0]}{1-\nu}, \quad (17)$$

при этом

$$\varepsilon_{zz}(z,t) = \frac{1-2\nu}{2G(1-\nu)} \sigma_{zz}(z,t) + \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \alpha_T [T_i(z,t) - T_0]. \quad (18)$$

Уравнение (8) получила В.А. Даниловская непосредственно из соотношений (3)–(5) и независимо от нее Т. Мура (ссылки в [1]).

Температурная функция $T_i(z,t)$, входящая в (13)–(18), есть решение задачи:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - \tau_r \frac{\partial^2 T_i}{\partial t^2}, \quad z > 0, \quad t > 0, \quad (19)$$

$$T_i(z,t) |_{t=0} = T_0, \quad \left. \frac{\partial T_i(z,t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \quad z \geq 0, \quad (20)$$

$$T_1(z,t) |_{z=0} = T_c, \quad t > 0, \quad (21)$$

$$\frac{1}{\tau_r} \int_0^t \left. \frac{\partial T_2(z,\tau)}{\partial z} \right|_{z=0} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_r}\right) d\tau = -\left(\frac{1}{\lambda_T}\right) q_0, \quad t > 0, \quad (22)$$

$$\frac{1}{\tau_r} \int_0^t \left. \frac{\partial T_3(z,\tau)}{\partial z} \right|_{z=0} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_r}\right) d\tau = h [T_3(z,t) |_{z=0} - T_c], \quad t > 0, \quad (23)$$

$$|T_i(z,t)| < \infty, \quad z \geq 0, \quad t \geq 0. \quad (24)$$

В безразмерных переменных

$$\xi = \frac{z}{\sqrt{a\tau_r}}, \quad \tau = \frac{t}{\tau_r}, \quad Bi^* = h\sqrt{a\tau_r}, \quad \beta = \frac{v_p}{v_T};$$

$$W_i(\xi, \tau) = \begin{cases} \frac{T_i(z, t) - T_0}{T_c - T_0}, & i = 1; 3; \\ \frac{T_i(z, t) - T_0}{q_0\sqrt{a\tau_r} / \lambda_T}, & i = 2; \end{cases}$$

$$\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \begin{cases} \frac{\sigma_{zz}(z, t)}{S(T_c - T_0)} & (1 - \text{я и } 3 - \text{я краевые задачи; } i = 1; 3) \\ \frac{\sigma_{zz}(z, t)}{Sq_0\sqrt{a\tau_r} / \lambda_T} & (2 - \text{я краевая задача; } i = 2), \end{cases}$$

где $S = \alpha_T(3\lambda + 2\mu) = \alpha_T \frac{E}{(1 - 2\nu)}$, задача (13)–(15), (19)–(24) будет иметь вид:

$$\beta^2 \frac{\partial \sigma_{\xi\xi}}{\partial \xi} - \frac{\partial^2 \sigma_{\xi\xi}}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 W_i}{\partial \tau^2}, \quad \xi > 0, \quad \tau > 0, \quad (i = 1, 2, 3); \quad (25)$$

$$\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) \Big|_{\tau=0} = \frac{\partial \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)}{\partial \tau} \Big|_{\tau=0} = 0, \quad \xi \geq 0, \quad (26)$$

$$\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) \Big|_{\xi=0} = 0, \quad \tau > 0; \quad |\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)| < \infty, \quad \xi \geq 0, \quad \tau \geq 0, \quad (27)$$

$$\frac{\partial W_i}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 W_i}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 W_i}{\partial \tau^2}, \quad \xi > 0, \quad \tau > 0 \quad (i = 1, 2, 3); \quad (28)$$

$$W_i(\xi, \tau) \Big|_{\tau=0} = \frac{\partial W_i(\xi, \tau)}{\partial \tau} \Big|_{\tau=0} = 0, \quad \xi \geq 0, \quad (29)$$

$$W_1(\xi, \tau) \Big|_{\xi=0} = 1, \quad \tau > 0, \quad (30)$$

$$\int_0^\tau \frac{\partial W_2(\xi, \tau')}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} \exp[-(\tau - \tau')] \partial \tau' = -1, \quad \tau > 0, \quad (31)$$

$$\int_0^\tau \frac{\partial W_3(\xi, \tau')}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} \exp[-(\tau - \tau')] \partial \tau' = Bi^* [W_3(\xi, \tau) \Big|_{\xi=0} - 1], \quad \tau > 0, \quad (32)$$

$$|W_i(\xi, \tau)| < \infty, \quad \xi \geq 0, \quad \tau \geq 0. \quad (33)$$

В пространстве изображений по Лапласу

$$\bar{W}_i(\xi, p) = \int_0^\infty \exp(-p\tau) W_i(\xi, \tau) \partial \tau,$$

$$\bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p) = \int_0^\infty \exp(-p\tau) \sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) \partial \tau$$

решение тепловой задачи (28)–(33) имеет вид:

$$\bar{W}_i(\xi, p) = \bar{f}_i^*(p) \exp[-\xi \sqrt{p(p+1)}]; \quad (34)$$

$$\bar{f}_i^*(p) = \begin{cases} \frac{1}{p}, & i = 1, \\ \sqrt{p+1} / p^{\frac{3}{2}}, & i = 2, \\ \frac{Bi^* \sqrt{p+1}}{p(\sqrt{p} + Bi^* \sqrt{p+1})}, & i = 3. \end{cases} \quad (35)$$

Напряжение $\bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p)$ при найденном соотношении (34) записывается в виде:

$$\bar{\sigma}_{\xi\xi}(\xi, p) = \bar{f}_i(p) \left\{ \exp[-\xi \sqrt{p(p+1)}] - \exp\left[-\left(\frac{\xi}{\beta}\right)p\right] \right\} \quad (36)$$

$$\bar{f}_i(p) = \begin{cases} \frac{\gamma_1}{p + \gamma_2}, & i = 1 \\ \frac{\gamma_1 \sqrt{p+1}}{\sqrt{p}(p + \gamma_2)}, & i = 2 \\ \frac{\gamma_1 Bi^* \sqrt{p+1}}{(\sqrt{p} + Bi^* \sqrt{p+1})(p + \gamma_2)}, & i = 3, \end{cases} \quad (37)$$

где $\gamma_1 = \frac{1}{(\beta^2 - 1)}$, $\gamma_2 = \frac{\beta^2}{(\beta^2 - 1)}$.

При нахождении оригиналов в (36)–(37) следует обратить внимание на величину параметра $\beta = v_p / v_T$. Так для органического стекла $\beta = 0,4$, для кварца и кремния $\beta = 0,7$, то есть $\beta < 1$; для стали $\beta = 3,4$, кристалла и алюминия $\beta = 1,8$, то есть $\beta > 1$. Величина параметра β имеет определяющее значение в записи интервалов изменения напряжения $\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)$ и в выборе основных соотношений операционного исчисления при переходе к оригиналам в (36)–(37). Предварительно приведем полезные соотношения, отсутствовавшие в справочниках по операционному исчислению:

$$\frac{\sqrt{p+1}}{\sqrt{p}(p+b)} \Leftarrow \int_0^\tau \left[\frac{\exp(-\tau')}{\sqrt{\pi\tau'}} + \sqrt{1-b} \exp(-b\tau') \Phi(\sqrt{(1-b)\tau'}) \right] \frac{d\tau'}{\sqrt{\pi(\tau-\tau')}}}, \quad (b < 1); \quad (38)$$

$$\frac{\sqrt{p+1}}{\sqrt{p}(p-b)} \Leftarrow \int_0^\tau \left[\frac{\exp(-\tau')}{\sqrt{\pi\tau'}} + \sqrt{b+1} \exp(b\tau') \Phi(\sqrt{(b+1)\tau'}) \right] \frac{d\tau'}{\sqrt{\pi(\tau-\tau')}}}, \quad b > 0; \quad (39)$$

$$\frac{\sqrt{p+1}}{\sqrt{p}(p+b)} \Leftarrow \int_0^\tau \left[\frac{1}{\sqrt{\pi\tau'}} - \frac{2\sqrt{b-1}}{\sqrt{\pi}} F(\tau') \right] \frac{\exp(-\tau')}{\sqrt{\pi(\tau-\tau')}}} d\tau', \quad b > 1. \quad (40)$$

Здесь $F(\tau) = \exp(-\tau^2) \int_0^\tau \exp(y^2) dy$ – вещественная функция, которая остается ограниченной при любых вещественных τ . При этом $F(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n 2^n \tau^{2n+1}}{(2n+1)!!}$, ($|\tau| < \infty$);

$\Phi(z) = (2 / \sqrt{\pi}) \int_0^z \exp(-y^2) dy$ – функция Лапласа. Заметим, что оригиналы изображений (37) (для $i = 2, 3$) сводятся к (38)–(40).

Находим из (36)–(37) для напряжений:
при $\beta < 1$

$$\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \begin{cases} 0, & \tau < \xi, \\ \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau), & \xi < \tau < \xi / \beta, \\ \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) - \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau), & \tau > \xi / \beta, \end{cases} \quad (41)$$

где

$$\sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) = f_i(\tau - \xi) \exp(-\xi / 2) + \xi / 2 \int_{\xi}^{\tau} f_i(\tau - \tau') \exp(-\tau' / 2) \frac{I_1\left(\frac{1}{2}\sqrt{\tau'^2 - \xi^2}\right)}{\sqrt{\tau'^2 - \xi^2}} d\tau', \quad (42)$$

$$f_1(\tau) = \gamma_1 \exp(-\gamma_2 \tau), \quad (43)$$

$$f_2(\tau) = \frac{\gamma_1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\tau} \left[\frac{\exp(-\tau')}{\sqrt{\pi \tau'}} + \sqrt{\gamma_1^*} \exp(\gamma_2^* \tau') \Phi\left(\sqrt{\gamma_1^* \tau'}\right) \right] \frac{d\tau'}{\sqrt{\tau - \tau'}}, \quad (44)$$

$$f_3(\tau) = \frac{\gamma_1 \gamma_3}{Bi^* \pi} \int_0^{\tau} \frac{\exp(-\tau') d\tau'}{\sqrt{\tau'(\tau - \tau')}} + \frac{\sqrt{\gamma_3^*} \gamma_1 \gamma_3^2}{Bi^* \sqrt{\pi} (\gamma_2 + \gamma_3)} \int_0^{\tau} \frac{\exp(\gamma_3 \tau') \Phi\left(\sqrt{\gamma_3^* \tau'}\right)}{\sqrt{\tau - \tau'}} d\tau' +$$

$$+ \frac{\sqrt{\gamma_1^*} \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3}{Bi^* \sqrt{\pi} (\gamma_2 + \gamma_3)} \int_0^{\tau} \frac{\exp(\gamma_2^* \tau')}{\sqrt{\tau - \tau'}} \Phi\left(\sqrt{\gamma_1^* \tau'}\right) d\tau' - \left[\frac{\gamma_1 \gamma_3 \gamma_3^*}{\gamma_2 + \gamma_3} \exp(\gamma_3 \tau) + \frac{\gamma_3 \gamma_1^2}{\gamma_2 + \gamma_3} \exp(-\gamma_2 \tau) \right], \quad (45)$$

$$\sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) = f_i(\tau - \xi / \beta) \quad (i = 1, 2, 3), \quad (46)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{\beta^2 - 1}, \quad \gamma_1^* = -\gamma_1, \quad \gamma_2 = 1 + \gamma_1, \quad \gamma_2^* = -\gamma_2, \quad \gamma_3 = \frac{Bi^{*2}}{1 - Bi^{*2}}, \quad \gamma_3^* = 1 + \gamma_3;$$

при $\beta > 1$

$$\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \begin{cases} 0, & \tau < \xi / \beta, \\ -\sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau), & \xi / \beta < \tau < \xi, \\ \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) - \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau), & \tau < \xi, \end{cases} \quad (47)$$

где

$$\sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) = f_i(\tau - \xi) \exp(-\xi / 2) + (\xi / 2) \int_{\xi}^{\tau} f_i(\tau - \tau') \exp(-\tau' / 2) \frac{I_1\left(\frac{1}{2}\sqrt{\tau'^2 - \xi^2}\right)}{\sqrt{\tau' - \xi^2}} d\tau', \quad (48)$$

$$f_1(\tau) = \gamma_1 \exp(-\gamma_2 \tau), \quad (49)$$

$$f_2(\tau) = \frac{\gamma_1}{\pi} \int_0^{\tau} \left[\frac{1}{\sqrt{\tau'}} - 2\sqrt{\gamma_1} F(\tau') \right] \frac{\exp(-\tau')}{\sqrt{\tau - \tau'}} d\tau', \quad (50)$$

$$f_3(\tau) = \frac{\gamma_1 \gamma_3}{Bi^* \pi} \int_0^\tau \frac{\exp(-\tau') d\tau'}{\sqrt{\tau'(\tau - \tau')}} + \frac{\sqrt{\gamma_3^* \gamma_1 \gamma_3^2}}{Bi^* \sqrt{\pi(\gamma_2 + \gamma_3)}} \int_0^\tau \frac{\exp(\gamma_3 \tau') \Phi(\sqrt{\gamma_3^* \tau'}) d\tau'}{\sqrt{\tau - \tau'}} - \frac{2\sqrt{\gamma_1 \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3}}{\pi Bi^* (\gamma_2 + \gamma_3)} \int_0^\tau \frac{\exp(-\tau') F(\tau') d\tau'}{\sqrt{\tau - \tau'}} - \left[\frac{\gamma_1 \gamma_3 \gamma_3^*}{\gamma_2 + \gamma_3} \exp(\gamma_3 \tau) + \frac{\gamma_3 \gamma_1^2}{\gamma_2 + \gamma_3} \exp(-\gamma_2 \tau) \right], \quad (51)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{\beta^2 - 1}, \quad \gamma_1^* = -\gamma_1, \quad \gamma_2 = 1 + \gamma_1, \quad \gamma_2^* = -\gamma_2, \quad \gamma_3 = \frac{Bi^{*2}}{1 - Bi^{*2}}, \quad \gamma_3^* = 1 + \gamma_3;$$

$$\sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) = f_i(\tau - \xi / \beta) \quad (i = 1, 2, 3). \quad (52)$$

Приведем для сравнения соответствующие модельные представления в рамках классической феноменологии Фурье (в (19) $\tau_r = 0$, в (25) $\beta^2 = 1$) в условиях температурного нагрева $T_1(z, t)|_{z=0} = T_c$, теплового нагрева $\lambda \frac{\partial T_2}{\partial z}|_{z=0} = -q_0$, нагрева средой $[\partial T_3 / \partial z]|_{z=0} = h[T_3(z, t)|_{z=0} - T_c]$, $t > 0$. В безразмерных переменных имеем:

$$\xi = \frac{v_p z}{a}, \quad \tau = \frac{v_p^2 t}{a}, \quad Bi = \frac{ha}{v_p}, \quad W_i(\xi, \tau) = \begin{cases} \frac{T(z, t) - T_0}{T_c - T_0}, & i = 1, 3 \\ \frac{T(z, t) - T_0}{(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)}, & i = 2 \end{cases}$$

$$\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \begin{cases} \frac{\sigma_{zz}(z, t)}{S(T_c - T_0)}, & i = 1, 3 \\ \frac{\sigma_{zz}(z, t)}{S(q_0 / \lambda_T)(a / v_p)}, & i = 2 \end{cases}$$

Находим для напряжения в пространстве изображений

$$\overline{\sigma_{\xi\xi}}(\xi, p) = -\overline{\phi_i}(p) [\exp(-\xi\sqrt{p}) - \exp(-\xi p)]$$

$$\overline{\phi_i}(p) = \begin{cases} \frac{1}{p-1}, & i = 1, \\ \frac{1}{\sqrt{p(p-1)}}, & i = 2, \\ \frac{Bi}{(p-1)(Bi + \sqrt{p})}, & i = 3, \end{cases}$$

в пространстве оригиналов

$$\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau) = \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) + \begin{cases} 0, & \tau < \xi \\ \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau), & \tau > \xi. \end{cases} \quad (53)$$

Здесь компоненты $\sigma_{\xi\xi}^{(1)}$ и $\sigma_{\xi\xi}^{(2)}$ имеют значения:

– в случае температурного нагрева ($i = 1$)

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) = -\frac{1}{2} \left[\exp(\tau - \xi) \Phi^* \left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau}} - \sqrt{\tau} \right) + \exp(\tau + \xi) \Phi^* \left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau} \right) \right], \\ \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) = \exp(\tau - \xi); \end{array} \right. \quad (54)$$

– в случае теплового нагрева ($i = 2$)

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) = -\frac{1}{2} \left[\exp(\tau - \xi) \Phi^* \left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau}} - \sqrt{\tau} \right) - \exp(\tau + \xi) \Phi^* \left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau} \right) \right], \\ \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) = \exp(\tau - \xi) \Phi(\sqrt{\tau - \xi}); \end{array} \right. \quad (55)$$

– в случае нагрева средой ($i = 3$)

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\xi\xi}^{(1)}(\xi, \tau) = -\frac{1}{2} \left[\frac{Bi}{Bi+1} \exp(\tau - \xi) \Phi^* \left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau}} - \sqrt{\tau} \right) + \frac{Bi}{Bi-1} \exp(\tau + \xi) \Phi^* \left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau} \right) \right] \\ \sigma_{\xi\xi}^{(2)}(\xi, \tau) = \frac{Bi^2}{Bi^2 - 1} \left\{ \exp(\tau - \xi) \left[1 - \frac{1}{Bi} \Phi(\sqrt{\tau - \xi}) \right] - \exp[Bi^2(\tau - \xi)] \Phi^*(Bi\sqrt{\tau - \xi}) \right\}; \end{array} \right. \quad (56)$$

Здесь $\Phi^*(z) = 1 - \Phi(z)$.

Физический анализ решений

Как следует из (41), (47) напряжение $\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)$ в фиксированной точке области $\xi > 0$ возникает спустя время $\tau = \xi$, если $\beta < 1$ ($v_p < v_\tau$) после воздействия источника теплоты на границу полупространства. Но в отличие от классической феноменологии Фурье (53) соотношения (41), (47) показывают наличие двух скачков напряжения: один – на фронте тепловой, другой – на фронте упругой волны, идущие соответственно со скоростями v_τ и v_p . На рис. 1–3 приведены графики зависимости напряжения от безразмерного времени в сечении $\xi' = 2$. Расчеты проведены по формулам (41)–(52). На рис. 4 представлены соответствующие кривые динамических термоупругих напряжений, рассчитанные по формулам (53) – (56) на основе уравнения параболического типа. Расчеты выполнены для значений $\beta = 0,4$ (органическое стекло), $\beta = 0,7$ (кварц, кремний), $\beta = 1,8$ (кристаллы, алюминий), $\beta = 3,4$ (сталь).

График показывает, что учет конечной скорости распространения теплоты приводит к существенному изменению картины динамических температурных напряжений по сравнению с данными на рис. 4. Рассмотрим фиксированное сечение внутри полупространства $\xi > 0$. При $\beta > 1$ напряжения в сечении равны нулю. В момент времени $\tau = \xi / \beta$ к этому сечению подходит продольная упругая волна напряжения, фронт которой движется со скоростью v_p : возникает скачком сжимающее напряжение, которое затем уменьшается. В момент времени $\tau = \xi$ к этому сечению подходит тепловая волна, фронт которой движется со скоростью v_τ : напряжение изменяется скачком, уменьшается и далее асимптотически стремится к нулю. При $\beta < 1$ в рассматриваемое сечение при $\tau = \xi$ приходит тепловая волна, фронт которой движется со скоростью v_τ : скачком возникает сжимающее напряжение, которое далее возрастает. В момент времени $\tau = \xi / \beta$ к сечению подходит продольная упругая волна, что вызывает скачкообразное изменение напряжения и его дальнейшее уменьшение до нуля.

На рис. 5 приведены кривые изменения $\sigma_{\xi\xi}(\xi, \tau)$ в сечении $\xi = 2$ при $\beta = 0,7$, $Bi = 0,3$, позволяющие провести сравнительный анализ различных режимов напряжения: температурного (30), теплового (31) и средой (32). Первый режим по сравнению со вторым и третьим связан с появлением сжимающих и растягивающих напряжений, и в этом

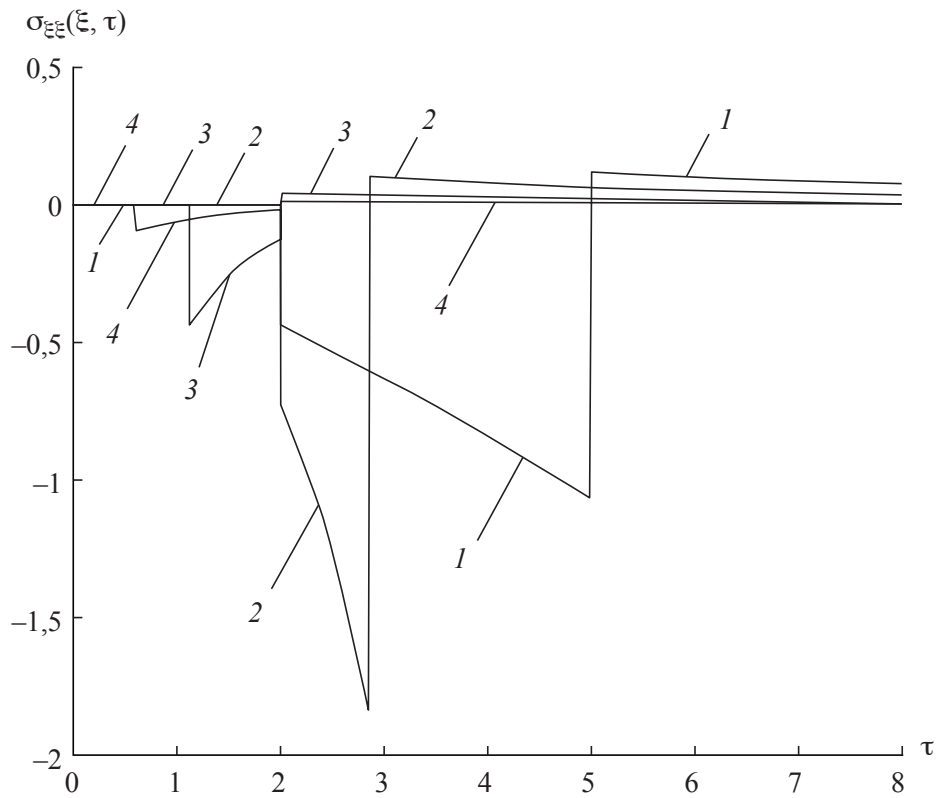


Рис. 1. Зависимость напряжения $\sigma_{\xi\xi}$ от времени в сечении $\xi = 2$ при температурном нагреве:
 1 ($\beta = 0.4$); 2 ($\beta = 0.7$); 3 ($\beta = 1.8$); 4 ($\beta = 3.4$)

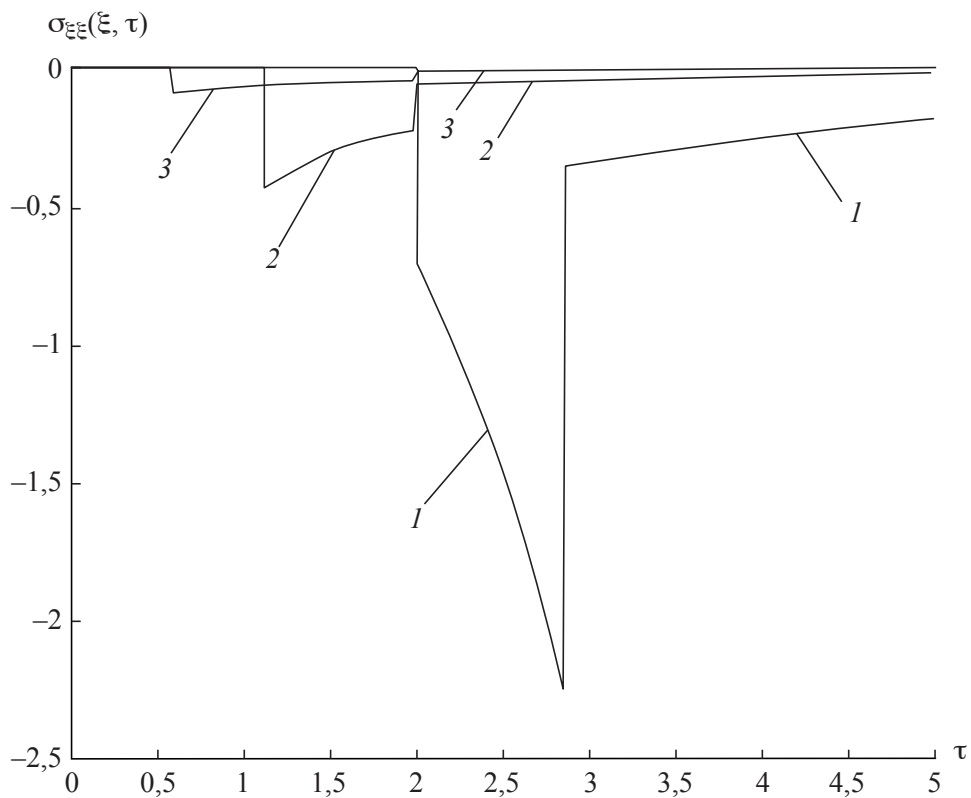


Рис. 2. Зависимость напряжения $\sigma_{\xi\xi}$ от времени в сечении $\xi = 2$ при тепловом нагреве:
 1 ($\beta = 0.4$); 2 ($\beta = 0.7$); 3 ($\beta = 1.8$); 4 ($\beta = 3.4$)

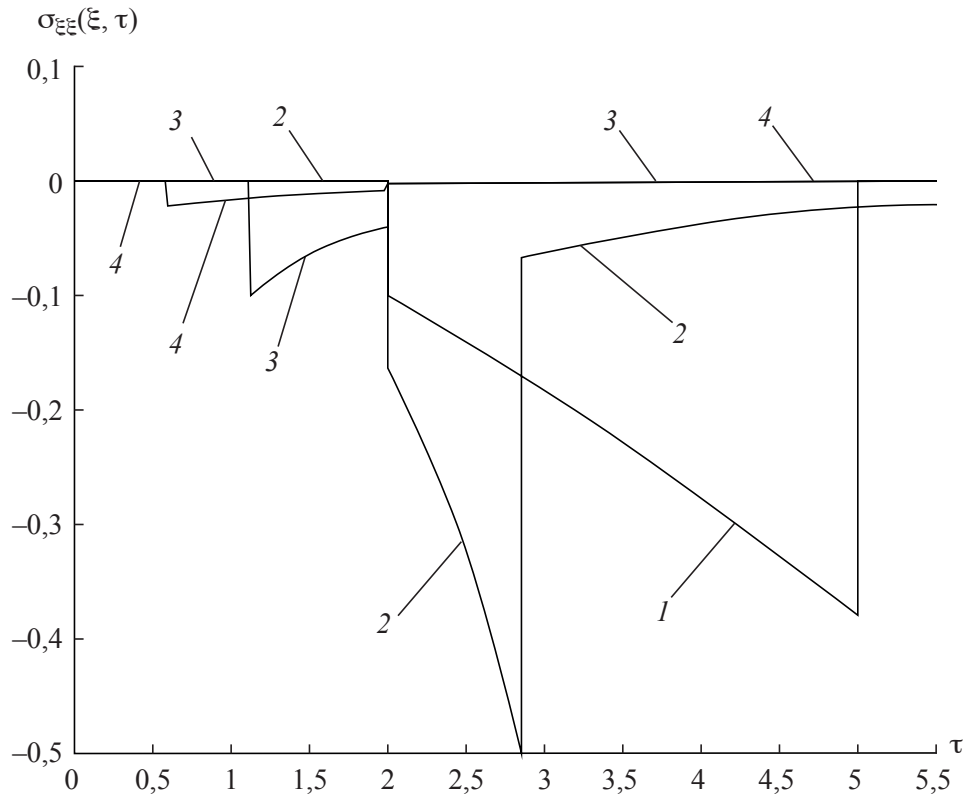


Рис. 3. Зависимость напряжения $\sigma_{\xi\xi}$ от времени в сечении $\xi = 2$ при нагреве средой: $Bi^* = 0,3$; 1 ($\beta = 0.4$); 2 ($\beta = 0.7$); 3 ($\beta = 1.8$); 4 ($\beta = 3.4$)

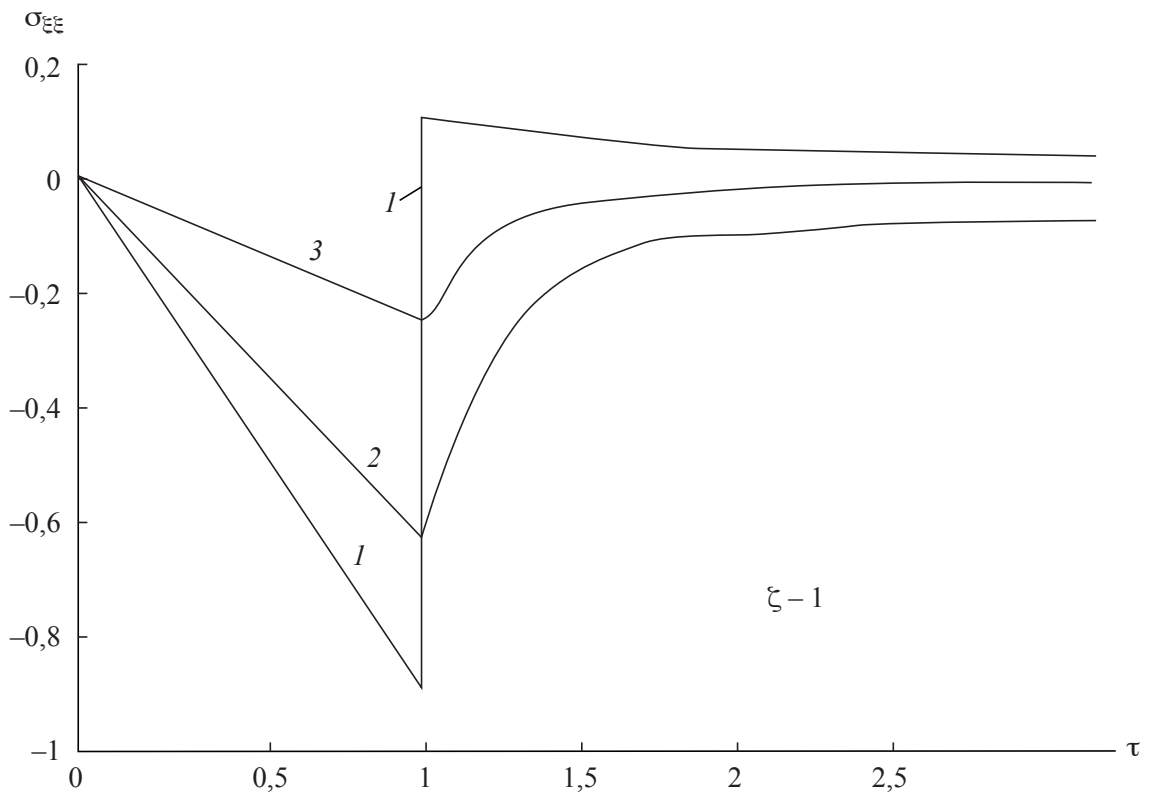


Рис. 4. Зависимость напряжения $\sigma_{\xi\xi}$ от времени в сечении $\xi = 1$: 1 – температурный нагрев; 2 – тепловой нагрев; 3 – нагрев средой ($Bi = 0.3$)

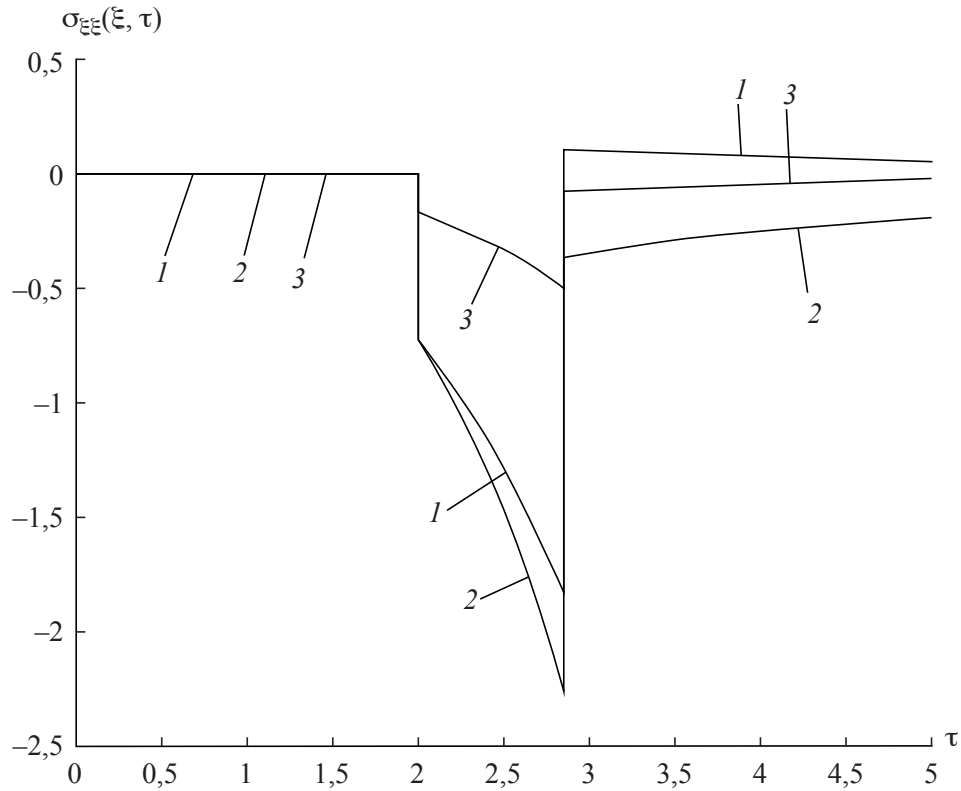


Рис. 5. Зависимость напряжения $\sigma_{\xi\xi}$ от времени в сечении $\xi = 2$: 1 – температурный нагрев; 2 – тепловой нагрев; 3 – нагрев средой ($Bi^* = 0.3$)

смысле он может быть наиболее опасным, хотя во втором режиме сжимающее напряжение (хотя и незначительное) превосходит первое. Следует отметить (рис. 4), что в классическом случае (53) при тепловом ударе наиболее опасным является именно режим внезапного температурного нагрева.

Представляет интерес получить расчетные инженерные формулы скачка напряжений $\sigma_{\xi\xi}$ на фронте термоупругой волны. Для этого воспользуемся теоремой запаздывания [3]:

$$\bar{f}(p)\exp(pt_0) \Leftrightarrow \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ f(t - t_0), & t > t_0, \end{cases}$$

видно, что в точке t_0 происходит скачок функции $f(t)$. Величина скачка рассчитывается по формуле:

$$|\Delta| = \lim_{t \rightarrow t_0+0} f(t - t_0) = \lim_{t \rightarrow 0+} f(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} p\bar{f}(p).$$

Находим, используя (36) – (37):

$$|\Delta_i| = \begin{cases} \frac{1}{|\beta^2 - 1|}, & i = 1, 2, \\ \frac{Bi^*}{(1 + Bi^*)|\beta^2 - 1|}, & i = 3. \end{cases} \quad (57)$$

Выражения (57) позволяют качественно и количественно оценить степень опасности теплового воздействия на упругий материал, так как соотношения (57) можно считать верхней оценкой максимума $|\sigma_{\xi\xi}|$, величина которого определяется условиями внешнего

нагрева, тепловыми и упругими свойствами материала. В (57) проявляется роль параметра β : при уменьшении разности скоростей распространения звука и теплоты в среде величина скачка напряжений возрастает, что создает реальную опасность разрушения материала.

ВЫВОДЫ

Исследована термическая реакция твердого тела на тепловой удар в терминах динамической термоупругости с учетом конечной скорости распространения теплоты. Дана корректная постановка тепловых задач для уравнений гиперболического типа; предложены различные модели при резких тепловых нагружениях границы тела: температурном, тепловом, средой. Выявлен наиболее опасный режим нагружения; предложены практические соотношения для скачков напряжений на фронте термоупругой волны, дающие верхнюю оценку максимума соответствующих температурных напряжений при тепловом ударе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Карташов Э.М., Кудинов В.А.* Аналитическая теория теплопроводности и термоупругости. М.: URSS, 2012. 670 с.
2. *Карташов Э.М., Кудинов В.В.* Аналитические методы теории теплопроводности и её приложений. М.: URSS. 2017. 1080 с.
3. *Карташов Э.М.* Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел М.: Высш.школа, 2001. 540 с.
4. *Формалев В.Ф.* Теплоперенос в анизотропных твердых телах. М.: Физматлит, 2015. 245 с.
5. *Kartashov E.M.* Analytical solutions of hyperbolic heat-conduction models // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2014. V. 87. N5. P. 1116–1125.
6. *Новацкий В.* Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
7. *Kartashov E.M.* Mathematical Models of Heat Conduction with a Two-Phase Lag // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016. V. 89. N2. P. 346–356.

УДК 544.452.5

**ГОРЕНИЕ ОБЕДНЕННЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА
В ДВИГАТЕЛЕ С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ****© 2018 г. В.М. ЗАЙЧЕНКО, А.Д. КИВЕРИН,
А.Е. СМЫГАЛИНА, А.И. ЦЫПЛАКОВ***Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

E-mail: anna.smygalina@gmail.com

В работе приведены результаты экспериментального и расчетно-теоретического исследования сгорания обедненных смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием. В качестве горючего использовался водород и смесь водород (90% об.) – метан (10%), взятые в соотношении с воздухом с коэффициентами избытка воздуха 1.4–3.0. При горении водородно-воздушной смеси с коэффициентом избытка воздуха 1.4 экспериментально наблюдались “обратные вспышки” во впускном коллекторе. В области больших коэффициентов избытка воздуха по полученным в эксперименте индикаторным диаграммам определены основные показатели работы двигателя. Индикаторный КПД для смесей водород–воздух составил 30–32%. В смесях с добавлением метана был получен наибольший КПД – 37%, реализуемый при использовании более раннего зажигания. Отмечена слабая зависимость КПД от коэффициента избытка воздуха. Двумерное численное моделирование динамики и горения смесей, выполненное с учетом условий экспериментов, подтвердило основные качественные зависимости, полученные экспериментально. Обнаружено значительное, до 60%, недогорание водорода при работе двигателя на смеси с коэффициентом избытка воздуха 3.0.

Ключевые слова: водород, метан, двигатель с искровым зажиганием, индикаторная диаграмма, бедные смеси, эксперимент, численное моделирование.

**COMBUSTION OF LEAN HYDROGEN-BASED MIXTURES
IN SPARK IGNITION ENGINE****V.M. ZAICHENKO, A.D. KIVERIN, A.E. SMYDALINA, A.I. TSYPLAKOV***Joint institute for high temperatures of RAS, Moscow, Russia*

E-mail: anna.smygalina@gmail.com

The paper presents results of experimental and numerical study of combustion of lean hydrogen-based mixtures in spark-ignition engine. Hydrogen and hydrogen (90% vol.) – methane (10%) mixtures at 1.4–3.0 air-to-fuel equivalence ratio were used as fuels. Backfire was observed experimentally in the engine running on the hydrogen-air mixture at 1.4 equivalence ratio. On the basis of experimental indicator diagrams general engine operating parameters were determined. Indicated efficiency of hydrogen-air mixtures was equal to 30–32%. Maximum indicated efficiency, 37%, was obtained for mixtures with methane addition and with the use of earlier spark timing. The dependence of efficiency on equivalence ratio was found to be weak. Two-dimensional numerical modelling of mixtures dynamics and combustion performed according to conditions of experiments confirmed general qualitative

dependencies found experimentally. Sufficient incomplete combustion of hydrogen, up to 60%, was found in case of engine running on hydrogen with air-to-fuel equivalence ratio 3,0.

Keywords: hydrogen, methane, spark-ignition engine, indicator diagram, lean mixtures, experiment, numerical modelling.

ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением модернизации существующей системы энергообеспечения в мире рассматривается переход к использованию распределенного энергоснабжения, в том числе с применением возобновляемых источников энергии. Это должно обеспечить поэтапный отказ от использования ископаемых топлив и замену углеводородных топлив возобновляемыми ресурсами [1]. Следует отметить, что использование распределенной энергетики, составной частью которой являются возобновляемые источники, экономически становится более выгодно, чем централизованное энергоснабжение [2]. Во многих случаях сроки окупаемости установок распределённой энергетики оказываются меньше, чем при сетевой, но эти технологии имеют недостатки. Из ряда недостатков можно выделить нестабильность выработки энергии во времени (примером являются ветряные электростанции, функционирующие только при достаточном ветровом давлении). И возникает необходимость резервирования системы энергообеспечения от возобновляемых источников. В густонаселенных регионах, где до настоящего времени основой энергообеспечения была сетевая энергетика, резервирование целесообразно проводить с применением развернутой ранее энергосети. В удалённых от энергосети регионах целесообразно включать в систему бесперебойного энергоснабжения эффективные накопители избыточной энергии, выработанной ранее.

Один из методов аккумуляирования энергии – выработка водорода за счет электролиза воды, осуществляемого посредством энергии возобновляемых источников [3]. При недостатке мощности, вырабатываемой возобновляемым источником энергии, запасенный водород может быть использован для генерации недостающей электрической мощности. Современные технологии аккумуляирования водорода оказываются более выгодными по сравнению с использованием аккумуляторных батарей [4]. Так, в кислотных аккумуляторах удельная запасаемая энергия находится на уровне 0.1–0.2 МДж/кг, а в баллонах со сжатым до 200 атм водородом – на уровне 1.4 МДж/кг. Системы хранения водорода в металлгидридах оказываются еще более эффективными (до 2–10 МДж/кг) [4].

Ставится задача эффективного и безопасного использования накопленного водорода. Из-за высокой химической активности водорода и относительно большой удельной теплоты сгорания в воздухе целесообразно использовать его как топливо в двигателе с искровым зажиганием, который может служить приводом электрогенератора или другой технической системы. Недостатком использования водорода в качестве топлива является его низкая детонационная стойкость, что требует разработки мер по предотвращению развития нештатных режимов в камерах сгорания двигателей. В работах [5,6] на основе численного анализа процессов в камере сгорания поршневого двигателя, наполненной водородом, показано, что бездетонационный режим сжигания водорода может быть обеспечен при малых в процентном отношении низкоэнергетических добавок к водороду, таких как метан, водяной пар и избыточный воздух.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей сжигания водорода в камере сгорания газопоршневого двигателя. На основе данных [5,6] проведены экспериментальные исследования для уточнения пределов безопасного и энергоэффективного использования водорода в качестве топлива для газопоршневого двигателя. Выполнено расчетно-теоретическое сопровождение экспериментального исследования, что позволило провести дополнительный анализ эффективности рассмотренных экспериментальных режимов, и провести верификацию расчетных методик авторов.

Свойства водорода и особенности его использования как моторного топлива для газопоршневого двигателя

Рассмотрим основные физико-химические и моторные свойства водорода в сравнении с пропаном и бензином (табл. 1) [7]. Согласно приведенным данным водород обладает наиболее высоким энергетическим выходом на единицу массы, превосходящим традиционные углеводородные топлива в 2.5–3 раза, но по удельной энергетике смеси с воздухом на единицу объема уступает большинству жидких и газообразных топлив. Теплота сгорания 1 м³ водородно-воздушной смеси на 10–15% меньше, чем у природного газа или бензина, поэтому мощность двигателей 1 л при переводе с углеводородного топлива на водород будет всегда меньше. При этом для формирования стехиометрической смеси с воздухом требуется больший объем водорода, что не принципиально, так как в рамках рассматриваемой концепции [5,6] водорода (как топливо) не находится достаточно.

Коэффициент молекулярного изменения при сгорании водорода $\mu = 0,85$, поэтому среднее индикаторное давление и КПД цикла двигателя на водороде оказывается ниже, чем в случае углеводородных топлив. Этот недостаток несколько компенсируется более высокой температурой сгорания водородно-воздушных смесей. Водородно-воздушные смеси отличаются высокой скоростью сгорания при постоянном объеме, что приводит к резкому росту скорости повышения давления в камере сгорания и, как следствие, к реализации нештатных режимов работы двигателя, характеризующихся стуком. Водород обладает малой детонационной стойкостью, октановое число по моторному методу для водорода оценивается от 45 [8] до 130 [9]. Такого рода нештатных режимов работы двигателя на водороде, однако, удастся избежать при разбавлении водорода воздухом до бедных составов или при добавлении в водородно-воздушную смесь менее активных углеводородных компонент [5,6]. Широкие концентрационные пределы горения водорода позволяют регулировать мощность двигателя изменением составов смеси (до достаточно обедненных).

Проблемой, связанной с переводом существующих двигателей на водородное топливо, является опасность преждевременного воспламенения водородосодержащей смеси

Таблица 1

Основные физико-химические свойства водорода, пропана и бензина

Параметр	Водород	Пропан	Бензин
Плотность, кг/м ³	0.089	2.02	720–750
Теплоемкость при постоянном объеме, кДж/м ³	0.904	2.675	—
Теплоемкость при постоянном давлении, кДж/м ³	1.277	3.048	—
Низшая теплотворная способность:			
МДж/кг	119.91	46.39	44.00
МДж/м ³	10.79	91.27	—
Температура воспламенения, °С	547–597	507	467–527
Теплотворная способность, приходящаяся на объемную долю горючего в стехиометрической смеси, МДж/м ³	3.19	3.46	3.83
Температура горения, °С	2227	1985	2197
Максимальная скорость горения при нормальных условиях, м/с	3.1	0.39	1.2
Пределы воспламенения в стехиометрической смеси с воздухом (по объему паров), %	4.0–74.2	2.3–9.5	0.6–6.0
Коэффициент избытка воздуха по пределам воспламенения	10.0–0.15	1.78–0.4	1.35–0.3

в двигателях с внешним смесеобразованием. Это приводит к так называемым “обратным вспышкам” смеси во впускном коллекторе, что недопустимо для надежности и безопасности эксплуатации. В работе [10], посвященной исследованиям сгорания водорода в ДВС, сообщается о надежной корреляции между границей “хлопков” во впускном коллекторе и удельным количеством тепла, выделяемом при сгорании, на единицу массы рабочего тела. Газопоршневой двигатель (на базе бензинового), переведенный на водородное топливо без значительной модернизации его конструкции, может нормально работать на водородно-воздушной смеси с коэффициентом избытка воздуха λ не ниже 2, что приводит к потере мощности до 50%.

Экспериментальная установка

Для экспериментального исследования процесса сгорания водородосодержащих топливных смесей в цилиндре двигателя внутреннего сгорания создана экспериментальная установка на базе газопоршневой электростанции АГ-75 электрической мощностью 75 кВт с газовым двигателем Г-266. Этот двигатель представляет собой конвертированный на газовое топливо дизельный двигатель Д-266.4 (изготовитель – ОАО “УКХ “ММЗ” г. Минск, Беларусь).

Газообразное топливо (водород или смесь водород-метан) подавалось через встроенный газопровод. Газопровод проходил внутри впускного коллектора и подводил топливо в зону впускного клапана. Такой способ подачи водородного топлива – способствующий предотвращению обратной вспышки [11]. Дроссельная заслонка во впускном коллекторе отсутствовала, мощность, развиваемая выделенным цилиндром, регулировалась только изменением количества подаваемого в цилиндр газообразного топлива. В резьбовую часть крана устанавливалась измерительная шайба. Необходимый расход газообразного топлива и состав смеси (λ) устанавливались изменением величины давления газа перед измерительной шайбой с известными расходными характеристиками. Таким образом, осуществлялось качественное регулирование мощности в цилиндре.

В отверстия головок блока цилиндров, предназначенных для пусковых свечей накаливания, были установлены резьбовые пробки. В это отверстие первого цилиндра установлен датчик давления “Курант ДИ-В” (ООО “Метроник”, г. Москва) для индицирования двигателя. Выбранный датчик не требует специальной системы охлаждения при работе двигателя. Сигнал датчика регистрировался двухканальным цифровым осциллографом RIGOL-DS-1052E.

На переднем носке коленчатого вала был установлен диск с узкой прорезью. Фотодиод освещался лазером через прорезь диска в момент прохождения поршнем верхней мертвой точки (ВМТ). Электрический сигнал с фотодиода (его максимальное значение соответствовало положению поршня в ВМТ) подавался на один из входов осциллографа. Момент зажигания фиксировался на индикаторных диаграммах с датчиком, установленным на высоковольтном проводе катушки зажигания первого цилиндра.

Электроагрегат при работе с выделенным цилиндром нагружался половиной от номинала электрической мощностью (~25 кВт), частота тока поддерживалась электронным регулятором на уровне 50 Гц (1500 мин⁻¹ коленчатого вала). Увеличение или уменьшение мощности первого “водородного” цилиндра при исследованиях автоматически компенсировалось соответствующим изменением мощности остальных пяти цилиндров, работающих на природном газе, путем управления подачей в них газо-воздушной смеси посредством дроссельной заслонки электронного регулятора.

Индицирование выделенного цилиндра двигателя на водороде и смесях водород–метан выполнено в диапазоне коэффициента избытка воздуха $\lambda = 1.5 \div 3.0$. Угол опережения зажигания (УОЗ) во всех опытах с чистым водородом соответствовал ВМТ и был выбран по данным [12] как обеспечивающий значения индикаторного КПД, близкие к максимальным. Для смесей водород–метан были проведены две серии экспериментов с УОЗ, соответствующим ВМТ, и УОЗ, составляющим 2,5° до ВМТ.

Постановка численного моделирования

При разработке новых и совершенствовании существующих подходов к сжиганию газообразных топлив в камерах сгорания двигателей различной конфигурации, включая двигатели с искровым поджигом, значительным компонентом исследовательского процесса является расчетно-теоретическое сопровождение эксперимента. Следует отметить, что разрабатываемая авторами концепция использования водорода в качестве основного компонента газообразной топливно-воздушной смеси была впервые рассмотрена в рамках численного моделирования [5, 6]. В настоящей работе в вычислительном эксперименте были воспроизведены все исследованные экспериментально режимы горения смесей различного состава, что позволило провести дополнительный анализ ряда параметров, характеризующих процесс сгорания, но не измеренных в эксперименте, таких как концентрации горючего и основных компонент, температура продуктов горения. В настоящей работе проведено двумерное численное моделирование газодинамики горения в осесимметричном цилиндре с заданной геометрией поршня. Полученные расчетные данные по измеряемым в эксперименте характеристикам хорошо согласуются с экспериментальными данными, подтверждают точность используемых расчетных методик и программных кодов.

Математическая модель представляет собой систему уравнений Навье–Стокса с учетом вязкости, теплопроводности, многокомпонентной диффузии и химического превращения. Для численного решения уравнений газодинамики использовался эйлерово-лагранжев метод “крупных частиц”, решение жесткой системы уравнений химической кинетики осуществлялось методом Гира. Описание математической модели и численного метода приводится в [5,13]. Используемый численный метод был апробирован при решении ряда нестационарных задач газодинамики горения [5, 6, 14]. Моделирование химического превращения проводилось с использованием детальных механизмов химической кинетики: для смесей водород–воздух применялся механизм [15], состоящий из 21 двусторонней реакции между 9 компонентами, для тройных смесей водород–метан–воздух – механизм DRM19 [16], состоящий из 80 двусторонних реакций между 20 компонентами.

В рамках численного моделирования рассматривались второй и третий такты работы четырехтактного двигателя внутреннего сгорания. Скорость поршня задавалась с учетом параметров двигателя [17]:

$$U_p = U_0 \frac{\pi}{2} \sin(2\pi vt) \left(1 + \frac{\cos(2\pi vt)}{\sqrt{R^2 - \sin^2(2\pi vt)}} \right),$$

где v – угловая скорость коленчатого вала; U_0 – величина, определяемая ходом поршня и угловой скоростью коленчатого вала, равная 6.25 м/с; R – отношение длины шатуна к радиусу кривошипа, равное 4,0. При движении поршня изменение состояния смеси в расчетных ячейках, прилегающих к поверхности поршня и подверженных его воздействию, рассчитывалось в приближении адиабатического сжатия и расширения в зависимости от такта.

Моделирование проводилось в двумерной постановке в цилиндрических координатах с учетом аксиальной симметрии. Использовались параметры двигателя: ход поршня 0.125 м, диаметр цилиндра 0.110 м, степень сжатия 11.4, угловая скорость вращения коленчатого вала 1500 мин⁻¹. Учитывалась реальная геометрия поршня, в поверхности которого для уменьшения степени сжатия в базовой комплектации дизельного двигателя была выполнена симметричная относительно оси цилиндра выемка объемом 9,51·10⁻⁵ м³. На рис. 1 для иллюстрации формы поршня приведена расчетная сетка в момент достижения поршнем ВМТ.

При моделировании учитывались потери тепла в стенки цилиндра и поршень. Потери тепла рассчитывались в приближении теплопереноса через многослойную стенку [18],

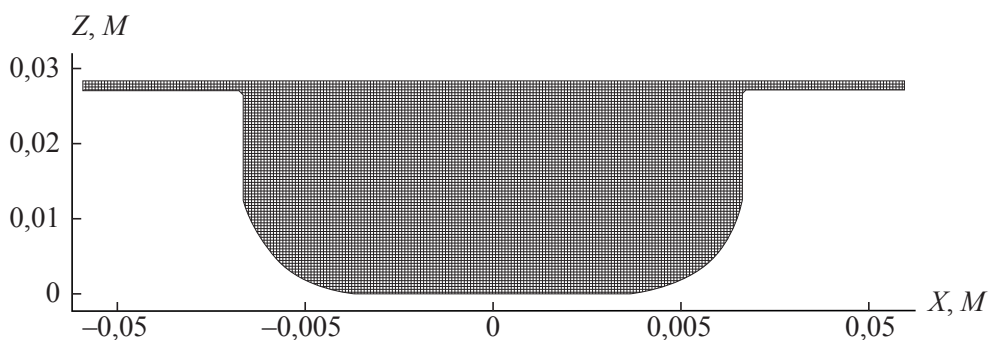


Рис. 1. Геометрия камеры сгорания в момент достижения поршнем ВМТ

при этом температура окружающей внешнюю поверхность цилиндра среды задавалась равной 300 К.

Расчеты проводились на однородной расчетной сетке с шагом 400 мкм, что оказалось достаточным для получения решения, удовлетворительно согласующегося с экспериментальными данными. Дополнительные тестовые расчеты, проведенные с учетом условий одного из выполненных экспериментов, для сгорания водородно-воздушной смеси с $\lambda = 1.5$ при УОЗ 0° п.к.в. до ВМТ, на сетках с более мелким шагом в 250, 200 и 100 мкм показали небольшое расхождение решения с полученным на сетке 400 мкм. Следует отметить, что при уменьшении шага расчетной сетки наблюдается локальное изменение формы поверхности пламени, то есть расчет на крупной сетке не достаточно достоверно воспроизводит локальную динамику фронта пламени, что несущественно в настоящей работе.

Искровой поджиг моделировался как вклад дополнительной энергии в течение 12 мкс в небольшой области радиусом 4 мм. Вклад энергии сопровождался резким повышением температуры до $\sim 30\,000$ К, что согласуется с результатами [19].

В начальном состоянии перед сжатием смесь находилась при стандартных температуре и давлении; концентрация задавалась однородной. В эксперименте однородность состава топливно-воздушной смеси в объеме достигалась к моменту искрового зажигания, что определялось процессами перемешивания на такте сжатия. Таким образом, на момент инициирования горения следует ожидать хорошее соответствие постановки задачи численного моделирования и условий, достигаемых в эксперименте. Начальная массовая скорость газа в расчетах задавалась равной нулю.

Результаты

Индикаторные показатели работы двигателя на водородно-воздушной смеси

На рис. 2 показаны индикаторные диаграммы, полученные в экспериментах по сжиганию смесей водород–воздух, в координатах P, ϕ , где ϕ – угол поворота коленчатого вала (у.п.к.в.). Состав смесей водород–воздух варьировался в диапазоне коэффициента избытка воздуха $\lambda = 1.5 \div 3.0$. При $\lambda = 1.4$ наблюдались “обратные вспышки”, поэтому рассмотрение более богатых смесей не проводилось. Из рис. 2 видно, что характер сгорания разных по составу смесей отличается. Так, с повышением λ наблюдается резкое снижение максимального давления, при $\lambda > 2.5$ максимальное давление при сгорании становится меньше давления сжатия. При сжигании водородно-воздушных смесей значение УОЗ 0° п.к.в. до ВМТ является наилучшим из-за малых времен задержек воспламенения водорода и больших скоростей распространения пламени. Угол, определяющий положение максимального давления P_z относительно ВМТ, $-\phi_z = 14^\circ$ п.к.в. при $\lambda = 1.5$, находится в теоретически оптимальном по зрения эффективности диапазоне $-12 \div 14^\circ$ п.к.в. [20]. По полученным индикаторным диаграммам были рассчитаны индикаторные показатели эффективности цикла – среднее индикаторное давление P_i и индикаторный КПД η_i . Из

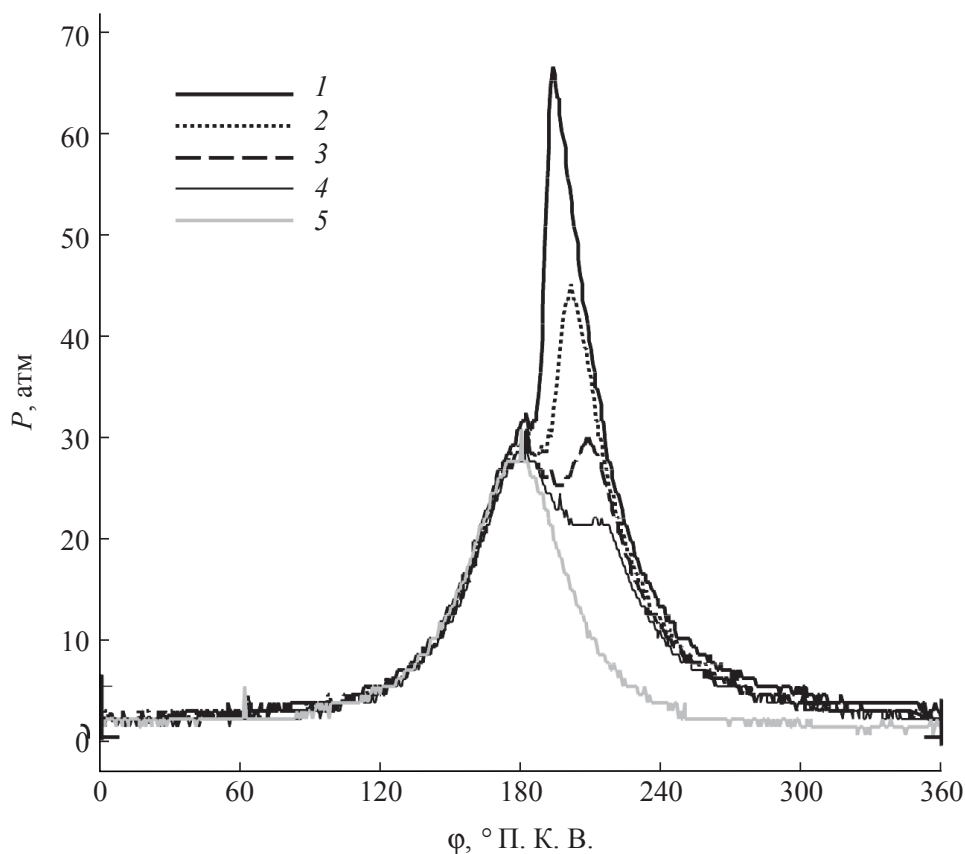


Рис. 2. Индикаторные диаграммы сгорания водородно-воздушных смесей в цилиндре двигателя при разных составах смеси; зажигание 180° (ВМТ): 1–4 – смесей с коэффициентами избытка воздуха 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 5 – режим без зажигания

Таблица 2

Показатели рабочего цикла двигателя на смеси водород–воздух, полученные в эксперименте при УОЗ 0° п.к.в. до ВМТ

λ	P_i , атм	N_i , кВт	η_i
3,0	3,89	6,80	0,30
2,5	4,71	7,28	0,31
2,0	5,63	8,65	0,31
1,5	7,54	11,72	0,32

данных табл. 2 видно, что в исследованном диапазоне составов смеси водород–воздух при увеличении λ (качественное регулирование) происходит снижение индикаторной нагрузки от $P_{i \max}$ до $\sim 0.5P_{i \max}$.

Сгорание при обеднении смеси (снижении нагрузки) происходит на стадии расширения, $\phi_z = 30...35^\circ$ п.к.в. (рис. 3а), то есть опережение зажигания выбрано неоптимальным. Но существенного уменьшения величины η_i не происходит, в отличие от двигателей с искровым зажиганием на углеводородном топливе, работающих в аналогичных режимах. Это объясняется особенностями водорода как газомоторного топлива именно тем, что он имеет широкий диапазон пределов воспламенения и высокую скорость распространения пламени даже в бедной смеси. Согласно [21] при сгорании водородных смесей на линии расширения могут уменьшаться потери тепла в стенки камеры сгорания, что несколько компенсирует потери от неоптимального закона тепловыделения.

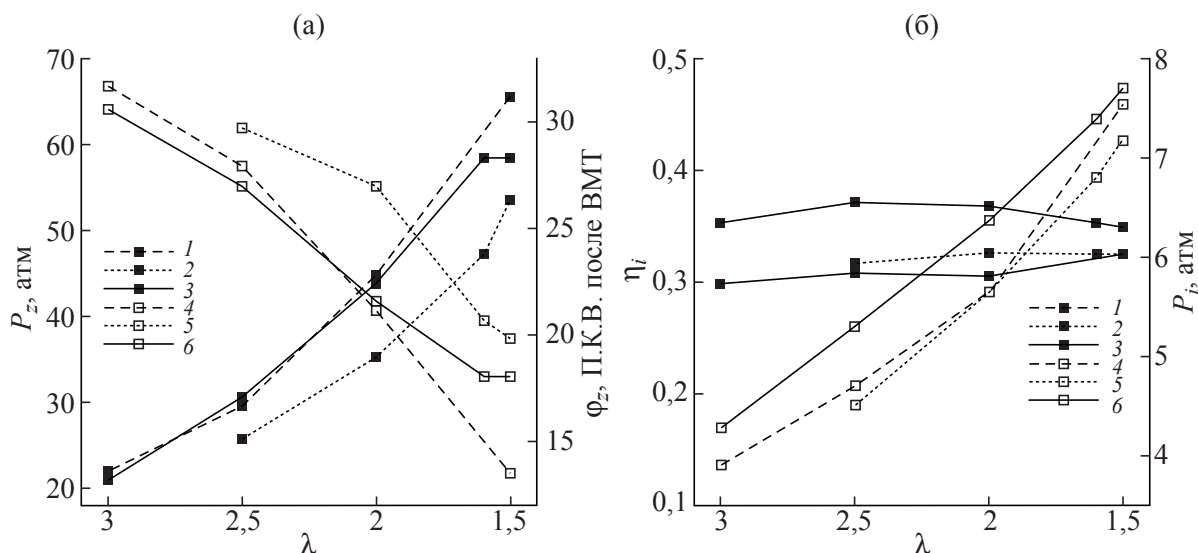


Рис. 3. Зависимости максимального давления (кривые 1–3, а), у.п.к.в. при максимальном давлении (4–5, а), индикаторного КПД (1–3, б), индикаторного давления (4–5, б) от коэффициента избытка воздуха λ для трех серий экспериментов: водород 100%, УОЗ в ВМТ (кривые 1, 4), водород 90%-метан 10%, УОЗ в ВМТ (кривые 2, 5), водород 90%-метан 10%, УОЗ 2,5° п.к.в. до ВМТ (кривые 3, 6)

Таблица 3

Индикаторные показатели двигателя при работе на водороде и природном газе

Топливо	УОЗ, ° п.к.в.	λ	P_p , кг/см ²	N_i , кВт	η_i
Водород	0	1,5	7,54	11,72	0,32
Природный газ	26	1,5	11,2	16,3	0,48
Природный газ	21	1,45	9,9	14,4	0,47

Примечание: В последней строке приведены экспериментальные данные [22], полученные расчетами при условии: электрический КПД генератора LSA равен 0,92, механический КПД полнокомплектного Г-266 равен 0,75. УОЗ неоптимальный для данного режима.

В табл. 3 дано сравнение индикаторных показателей двигателя при его работе на водороде и природном газе с одинаковыми объемным наполнением цилиндра горючей смесью и коэффициентом избытка воздуха. Из данных видно, что при оптимальных регулировках опережения зажигания индикаторные КПД η_i и мощность цилиндра N_i на водороде на ~30% ниже, чем на природном газе.

При длительной (более 30 мин) работе на водороде с избытком воздуха $\lambda = 1.5 \div 2.0$ имели место “хлопки” во впускном коллекторе. Устранение “перекрытия клапанов” в ВМТ регулировкой зазора в их приводе и снижение температуры охлаждающей жидкости с 75...80 °С до 65...68 °С позволило полностью устранить указанное нарушение рабочего процесса в выделенном цилиндре.

Сравнение эффективности работы двигателя на водороде и смесях водород–метан

В исследовании были проведены две серии экспериментов по работе двигателя на смеси водород-метан (90% H₂ по объему, 10% CH₄) при различном разбавлении воздухом. Как и в экспериментах по сжиганию чистого водорода рассматривался диапазон $\lambda = 1.5 \div 3.0$. Эксперименты проводились при двух различных УОЗ: в одной серии УОЗ соответствовал ВМТ, во второй – 2,5° п.к.в. до ВМТ. Приведенные на рис. 3 зависимости основных показателей работы двигателя на смесях водород–воздух и водород–метан–воздух

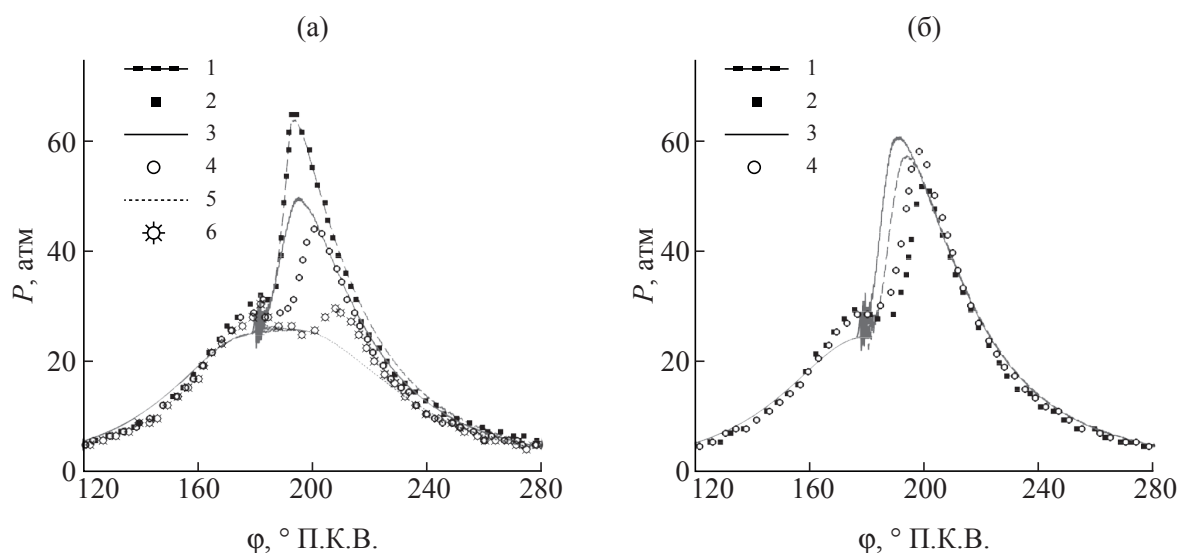


Рис. 4. Индикаторные диаграммы, полученные в расчетах (линии) и экспериментах (символы) для (а) смесей водород–воздух, $\lambda = 1,5$ (1–2); 2,0 (3–4); 2,5 (5–6), УОЗ в ВМТ, (б) смесей водород–метан–воздух, $\lambda = 1,5$, УОЗ в ВМТ (1–2), УОЗ – 2,5° п.к.в. до ВМТ (3–4)

от коэффициента избытка воздуха позволяют сделать выводы. Для смесей с метаном использование раннего зажигания более выгодно по эффективности: значения максимального давления P_z , индикаторного давления P_i и КПД η_i для этих режимов оказываются больше по сравнению с аналогичными значениями, получаемыми в режимах при УОЗ в ВМТ, а максимальное давление, характеризуемое ϕ_z , получается раньше. При фиксированном λ замещение 10% водорода метаном от общего количества топлива приводит к снижению максимального и индикаторного давлений и росту величины ϕ_z (рис. 3). Индикаторный КПД при этом немного увеличивается, это объясняется тем, что начальное теплосодержание смесей с метаном меньше аналогичных значений для смесей водород–воздух. Более раннее зажигание обеспечивает повышение эффективности работы двигателя на смесях с метаном, так что такие режимы оказываются по своим показателям практически идентичными режимам сжигания чистого водорода, по индикаторному давлению и КПД – превосходящими последние.

При фиксированном содержании водорода тройные смеси водород–метан–воздух оказываются более эффективными для работы двигателя, чем чистые водородно–воздушные смеси: смеси с метаном как при УОЗ в ВМТ, так и при более раннем зажигании приводят к большим значениям P_z , P_i и η_i и более низким значениям ϕ_z . Это объясняется тем, что замещение некоторой доли водорода метаном приводит к уменьшению коэффициента избытка воздуха смеси, поскольку для сгорания метана требуется больший объем воздуха, чем для сгорания водорода. При повышении коэффициента избытка воздуха скорость горения водородно–воздушной смеси падает, тогда как горение в избыточном воздухе добавленного в смесь метана интенсифицирует процесс горения тройной смеси. Эффективность сгорания смеси с добавлением метана оказывается выше. Но в [5,6] получено, что в смесях H_2 –воздух около-стехиометрического состава метан лучше ингибирует горение, чем избыточный воздух. Добавление и метана, и избыточного воздуха приводит к уходу от стехиометрии. При этом добавление метана к большему снижает скорость горения и эффективность сгорания такой смеси.

На рис. 4 представлены индикаторные диаграммы, полученные при численном моделировании, и соответствующие экспериментальные диаграммы для трех серий экспериментов. Полученные в расчетах индикаторные диаграммы хорошо согласуются с экспериментальными данными и подтверждают сделанные на основе экспериментальных результатов качественные выводы. Для смесей с метаном более раннее зажигание является более эффективным (рис. 4 б): при раннем зажигании максимальное давление P_z

больше, а угол ϕ_z меньше. Сравнение рис. 4 а и 4 б показывает, что режим горения смеси с добавлением метана эффективнее режима горения чистого водорода, несмотря на то, что в случае с $\lambda = 2.0$ (рис. 4 а) содержание водорода в смеси составляло 17.36%, в случае рис. 4 б – 15,95%. Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что при одинаковом содержании водорода в топливно-воздушной смеси добавление метана приводит к более эффективным режимам работы, при одинаковом λ ($\lambda = 1.5$ на рис. 4 а и б) показатели работы двигателя отличаются незначительно.

Прогноз температурного режима, полноты сгорания и выхлопа CO и CO₂

На рис. 5 представлены полученные в численном моделировании эволюции объемных долей (Y) H₂ и H₂O при сгорании смесей водород–воздух при различных λ и водород–метан–воздух при $\lambda = 1.5$ и двух значениях УОЗ. При повышении λ в конце такта расширения значения $Y(\text{H}_2)$ увеличиваются и значения $Y(\text{H}_2\text{O})$ уменьшаются. Немонотонность указанной зависимости наблюдается при переходе от смеси водород–воздух с $\lambda = 1,5$ к смеси с $\lambda = 2.0$: здесь наблюдается меньшее недогорание водорода в последнем случае, что можно объяснить большим значением начальной объемной доли водорода при $\lambda = 1.5$ по сравнению с $\lambda = 2.0$. При этом конечные значения концентрации недогоревшего водорода в этих случаях весьма близки.

В сравнении с результатами для смесей водород–воздух в смесях с добавлением метана при $\lambda = 1.5$ наблюдается меньшее недогорание водорода, что обусловлено начальным большим содержанием водорода в смесях водород–воздух при $\lambda = 1.5$ и 2.0 (21.87% об. и 17.36%) по сравнению со смесью водород–метан–воздух, $\lambda = 1.5$ (15.95%). При этом $Y(\text{H}_2\text{O})$ принимает большие значения на конец такта расширения для смеси с метаном по сравнению со случаем водородно-воздушной смеси ($\lambda = 2.0$), что подтверждает указанный ранее факт о большей эффективности сгорания смеси с добавлением метана по сравнению со случаем чистой водородно-воздушной смеси при одинаковом содержании водорода в смеси (в данном случае содержание водорода в смеси с метаном несколько меньше, чем в смеси без метана).

Приведенные на рис. 6 эволюции объемных долей исходного горючего, метана, и основных продуктов, CO и CO₂ при сгорании смеси с метаном при $\lambda = 1.5$ и двух значениях УОЗ показывают, что небольшое уменьшение УОЗ не приводит к существенным различиям в содержании данных веществ по окончании сгорания. Объемные доли CO и CO₂ в конце такта расширения составляют 0.23% об. и 1.46%.

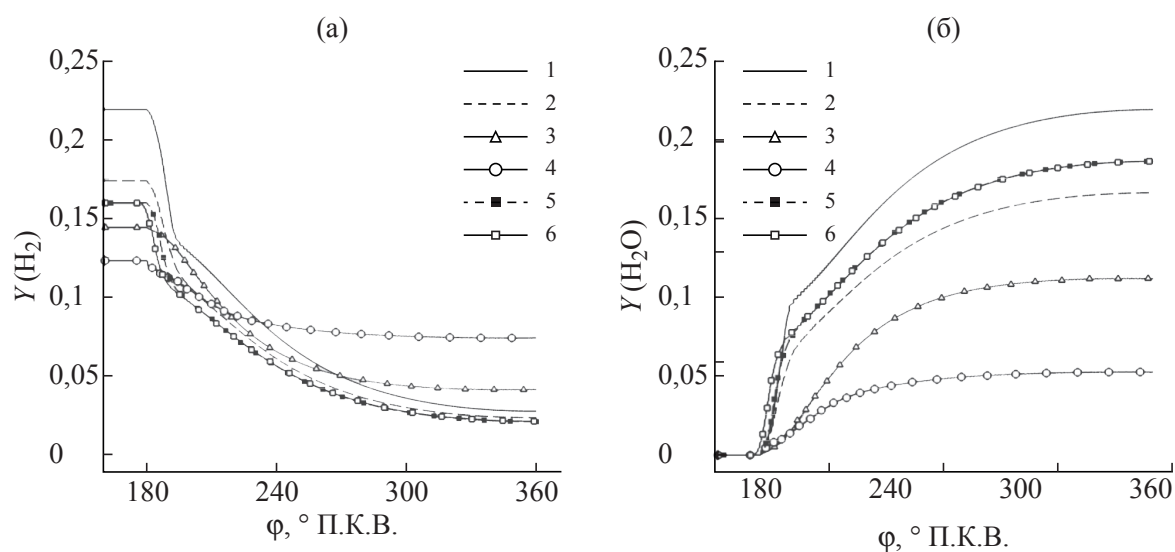


Рис. 5. Объемные доли H₂ (а) и H₂O (б) в зависимости от у.п.к.в., полученные при моделировании сгорания смесей H₂–воздух при $\lambda = 1.5; 2.0; 2.5; 3.0$ (кривые 1–4) и смесей H₂–CH₄–воздух при $\lambda = 1.5$ и УОЗ в ВМТ (5) и 2,5° п.к.в. до ВМТ (6)

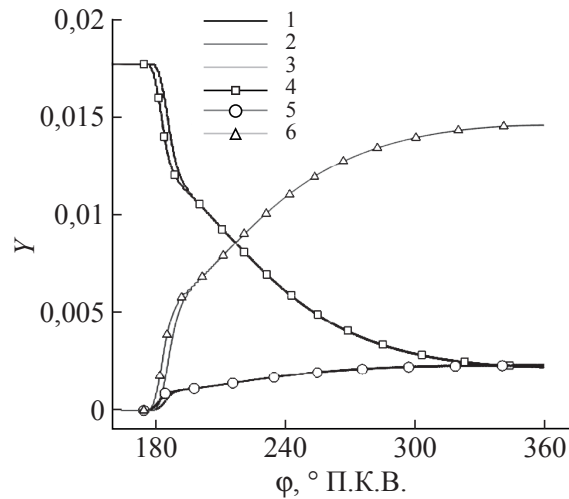


Рис. 6. Объемные доли CH_4 (кривые 1;4), CO (2;5), CO_2 (3;6) в зависимости от у.п.к.в. для смесей H_2 – CH_4 –воздух при $\lambda = 1.5$ и УОЗ в ВМТ (1–3) и 2.5° п.к.в. до ВМТ (4–6)

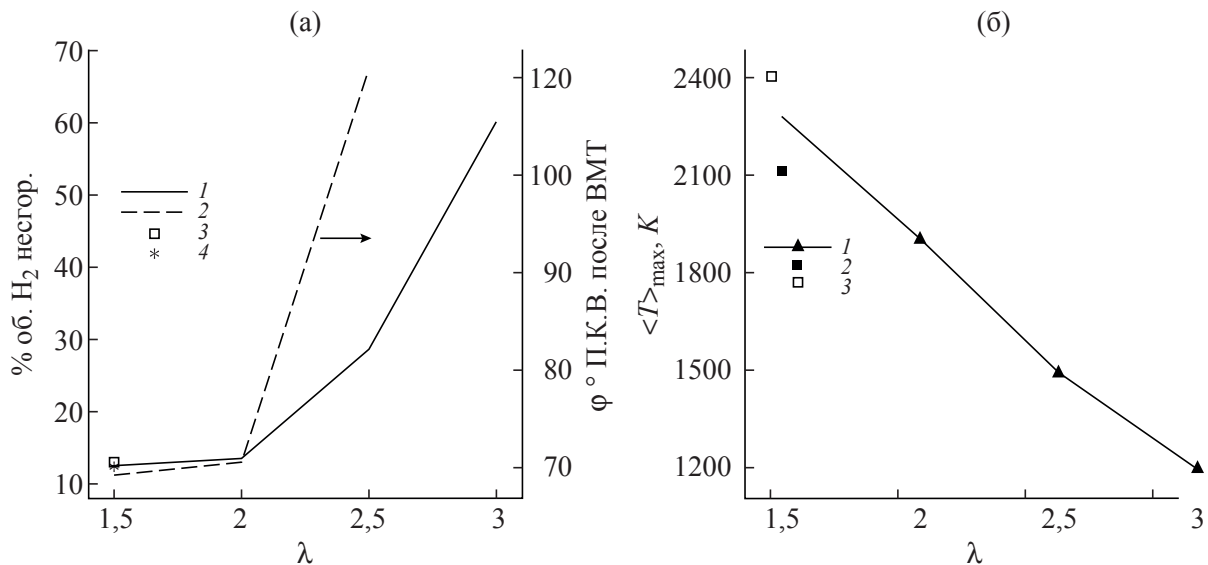


Рис. 7. А. Количество несгоревшего H_2 в процентах от первоначального объема (1;3); длительность сгорания, выражаемая в у.п.к.в. от ВМТ, при котором достигается сгорание 70% первоначального объема H_2 (2;4). Результаты получены для смесей H_2 –воздух (1;2), смеси H_2 – CH_4 –воздух (3;4); б. Максимальные за цикл значения средней по объему температуры при сгорании смесей H_2 –воздух (1), смеси H_2 – CH_4 –воздух при УОЗ в ВМТ (2) и УОЗ $2,5^\circ$ п.к.в. до ВМТ (3)

Обобщенные результаты по количеству несгоревшего водорода приведены на рис. 7 а. При сгорании смесей водород–воздух с $\lambda = 1.5$ и 2.0 и смеси с метаном с $\lambda = 1.5$ объем и масса несгоревшего водорода составляют ~ 12 –15% по отношению к начальному объему и массе. При этом доля несгоревшего метана по объему составляет 12.4%, по массе – 14.6%. С повышением λ происходит резкое увеличение доли несгоревшего водорода – до 28% по объему при $\lambda = 2.5$ и до 60% при $\lambda = 3.0$. Закономерно увеличивается длительность сгорания, определяемая в данной работе углом поворота коленчатого вала, отсчитываемого от ВМТ, при котором наблюдается сгорание 70% от первоначального объема водорода. Длительность сгорания для смесей с $\lambda = 1.5$ и 2.0, в том числе для смеси с метаном, составляет $\sim 70^\circ$ п.к.в., при $\lambda = 2,5$ – $\sim 120^\circ$ п.к.в.

Работа двигателя на смесях на основе водорода с различными значениями λ сопровождается различными температурными режимами. Сгорание водорода в сравнении с другими топливами характеризуется появлением значительно более высоких температур,

при которых происходит окисление азота воздуха и образование оксидов NO_x . Влияние λ на величину максимальной за цикл среднеобъемной температуры оказывается существенным (рис. 7). Эта зависимость имеет практически линейный характер, температура снижается от ~ 2200 К при $\lambda = 1.5$ до ~ 1200 К при $\lambda = 3.0$. Использование смеси с метаном при одинаковом λ приводит к понижению максимальной за цикл среднеобъемной температуры. Такие низкие значения температуры при больших λ могут приводить к отсутствию оксидов азота в продуктах сгорания. Режимы работы при больших λ характеризуются чрезвычайно большим недогоранием водорода (в том числе в связи с затуханием горения) и невысокими значениями максимального и индикаторного давлений, что существенно при выборе оптимальных параметров и условий для работы двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты работы.

На базе газопоршневого электроагрегата АГ-75 создана экспериментальная установка с выделенным цилиндром, позволяющая проводить исследования на различных видах газомоторного топлива с получением индикаторных диаграмм и показателей рабочего процесса. Показана возможность использования чистого водорода в качестве топлива газового двигателя с внешним смесеобразованием, искровым зажиганием и степенью сжатия 11.4 при качественном регулировании без каких-либо нарушений рабочего процесса.

Используемый в экспериментах диапазон коэффициентов избытка воздуха 1.5–3.0 ограничен снизу значением 1.4, при котором наблюдалось образование “обратных вспышек”.

На основе индикаторных диаграмм, полученных в эксперименте, определены показатели работы двигателя с искровым зажиганием на водородно–воздушных и водород–метан–воздушных смесях (90% H_2 , 10% CH_4) в диапазоне коэффициента избытка воздуха 1.5–3.0 и при различном УОЗ для смесей с метаном. Индикаторный КПД на исследованных режимах слабо зависит от λ и для смесей водород–воздух составляет 30–32%. Для смесей с добавлением метана КПД выше, чем для смесей водород–воздух. Самым высоким КПД оказывается для смесей с метаном при использовании раннего зажигания.

Работа двигателя на смесях с добавлением метана более эффективна, чем для чистого водорода, при одинаковом содержании водорода в смеси. Использование чистого водорода в качестве топлива газового двигателя приводит к снижению его индикаторной мощности и КПД на $\sim 30\%$ по сравнению с получаемыми на природном газе.

Двумерное численное моделирование динамики и горения смесей, выполненное согласно условиям проведенных экспериментов, подтвердило качественные зависимости эффективности работы двигателя от состава смеси и УОЗ. Показано, что при одинаковом содержании водорода в смеси добавление метана приводит к более эффективной работе двигателя. При больших значениях λ наблюдалось значительное, до 60%, недогорание водорода, при данных λ среднеобъемная температура достигала ~ 1200 К, что снижает вероятность образования оксидов азота. В рассматриваемом диапазоне обедненных составов водородно–воздушных смесей могут наблюдаться медленные режимы горения (до погасания пламени), что требует дополнительного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батенин В. М., Зайченко В. М., Леонтьев А. И., Чернявский А. А. Концепция развития распределенной энергетики в России // Изв. РАН. Энергетика. 2017. № 1. С. 3–18.
2. Зайченко В. М., Чернявский А. А. Сравнительные характеристики распределенных и централизованных схем энергоснабжения // Промышленная энергетика. 2016. № 1. С. 2–8.
3. *Da Rosa A. V.* Fundamentals of renewable energy processes. Oxford (UK): Academic Press, 2013. 389 p.

4. *Зайченко В.М., Чернявский А.А.* Автономные системы энергоснабжения. М.: Недра, 2015. 219 с.
5. *Смыгалина А.Е., Зайченко В.М., Иванов М.Ф., Киверин А.Д.* Горение смесей на основе водорода в газопоршневом двигателе // Изв. РАН. Энергетика. 2015. № 2. С. 120–130.
6. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Зайченко В.М.* Об использовании водорода в качестве топлива для двигателей в энергетическом цикле удаленных производственных объектов // ЖТФ. 2018. 88. № 1. С. 147–150.
7. *Морозов Г.* Водород – топливо будущего // Катера и яхты. 1984. № 2. С. 4–7.
8. *Мищенко А.И.* Применение водорода для автомобильных двигателей. Киев: Наукова думка, 1984. 143 с.
9. Hydrogen fuel cell engines and related technologies: Rev 0, 2001. https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf
10. *Магидович Л.Е., Румянцев В.В.* Условия сгорания водородо-воздушной смеси в двигателях внутреннего сгорания // Двигателестроение. 1983. № 5. С. 59–60.
11. *Левтеров А.М., Савицкий В.Д.* Экспериментальный образец водородного автомобиля на базе модели Газ-2705 // Автомобильный транспорт. 2008. № 22. С. 17–23.
12. *Shudo T.* Improving thermal efficiency by reducing cooling losses in hydrogen combustion engines // Intern. J. Hydrogen Energy. 2007. V. 32(17). P. 4285–4293.
13. *Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S., Liberman M.A.* Hydrogen-oxygen flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in three-dimensional rectangular channels with no-slip walls // Intern. J. Hydrogen Energy. 2013. V. 38(36). P. 16427–16440.
14. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Клумов Б.А., Фортвов В.Е.* От горения и детонации к окислам азота // УФН. 2014. Т. 184. № 3. С. 247–264.
15. *O Conaire M., Curran H.J., Simmie J.M. et al.* A Comprehensive modeling study of hydrogen oxidation // Intern. J. Chem. Kinetics. 2004. V. 36(11). P. 603–622.
16. *Kazakov A., Frenklach M.* <http://www.me.berkeley.edu/drm/>
17. *Heywood J.B.* Internal Combustion Engine Fundamentals. N.Y.: Mc. Graw Hill, 1988. 930 p.
18. *Коротких А.Г.* Теплопроводность материалов. Томск: Изд. Томского политехн. универс., 2011. 97 с.
19. *Vane S.P.M., Ziegler J.L., Shepherd J.E.* Investigation of the effect of electrode geometry on spark ignition // Combustion and Flame. 2015. V. 162. P. 462–469.
20. *Воинов А.Н.* Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977. 277 с.
21. *Shudo T.* A new equation to describe cooling loss in hydrogen combustion engines which was developed from the equation for turbulent heat transfer of pipe flows // 6th World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics. April 17–21, 2005. Matsushima, Miyagi, Japan.
22. *Цыплаков А.И.* Газопоршневые энергоустановки на генераторном газе: особенности конструкции, опыт эксплуатации, результаты экспериментальных исследований. Препринт ОИВТ РАН, № 3-512, 2013. 39 с.

УДК 62-522.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ
И РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХДРОССЕЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ НА СТАТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ РУЛЕВОЙ МАШИНЫ РАКЕТНОГО БЛОКА**

© 2018 г. О.Б. БЕЛОНОВ

*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева,
г. Королев, Московская обл., Россия*

E-mail: obelonogoff@mail.ru

В статье приводятся результаты исследований влияния конструкционных и регулировочных параметров четырехдроссельного электрогидравлического усилителя на статические характеристики рулевой машины ракетного блока. Исследования проводятся методами статического анализа, включающего методы расчета статических характеристик автономной однокаскадной рулевой машины с четырехдроссельным электрогидравлическим усилителем с отрицательным перекрытием дроссельных окон прямоугольной формы золотниковыми плунжерами. Исследования показали, что рулевая машина не обладает статической устойчивостью. Показано, что наклон скоростной характеристики рулевой машины исключительное влияние оказывает безразмерный параметр локальной толщины набегающей стенки гильзы (ведомой оси трехшестеренного насоса). Вариацией этого параметра может регулироваться угол наклона скоростной характеристики рулевой машины, то есть ее коэффициент усиления. Предлагаются конструкционные решения рулевой машины, позволяющие улучшить их выходные характеристики и облегчить регулировку.

Ключевые слова: конструкционные и регулировочные параметры; электрогидравлический усилитель; рулевая машина; статические характеристики.

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF STRUCTURAL
AND ADJUSTING PARAMETERS OF A QUADRUPLE-ORIFICES
ELECTROHYDRAULIC AMPLIFIER ON THE STATIC CHARACTERISTICS
OF ROCKET PACK STEERING ACTUATOR**

O.B. BELONOGOV

*S.P. Korolev Rocket end Space Public Corporation Energia (RSC Energia),
Korolev, Moscow Region, Russia*

E-mail: obelonogoff@mail.ru

The article considered the results of researches of influence of constructional and adjusting parameters of the quadruple-orifices electrohydraulic amplifier on static characteristics of the steering actuator of the rocket pack. The studies are carried out using static analysis methods, including methods for calculating the static characteristics of an autonomous

single-stage steering actuator with a quadruple-orifices electrohydraulic amplifier with negative overlapping of throttling windows of rectangular shape with spool plugs. As a result of research it is shown that the steering actuator does not have static stability. It is shown that the slope of the speed characteristic of the steering actuator is exerted by the dimensionless parameter of the local thickness of the incoming liner wall (the driven axis of the three-tier pump). Consequently, with the help of the variation of this parameter, it is possible to adjust the slope angle of the speed characteristic of the steering actuator, i.e. its gain factor. The design solutions of the steering actuator are proposed, which allow improving their output characteristics and facilitating adjustment.

Keywords: structural and adjusting parameters; electro-hydraulic amplifier; steering actuator; static characteristics.

Функцию исполнительных органов систем управления вектором тяги (СУВТ) жидкостных ракетных двигателей баллистических ракет, космических летательных аппаратов и их разгонных блоков (РБ) выполняют автономные однокаскадные аналоговые электрогидравлические рулевые машины (РМ), включающие электронасосный агрегат, электрогидравлический усилитель (ЭГУ) и силовой гидроцилиндр [1,2].

Четырехдроссельный ЭГУ РМ (рис. 1) состоит из электромеханического узла управления (УУ) и двух простейших трехходовых золотниковых гидрораспределителей (ГР) [3–5], каждый включает золотниковый плунжер и гильзу. В гильзе предусмотрены сквозные радиальные прямоугольные отверстия, образующие вместе с золотниковым плунжером дроссельные окна прямоугольной формы [6–8].

Конструкционной особенностью ЭГУ РМ является размещение золотниковых плунжеров в полых вращающихся осях трехшестеренных насосов, исполняющих роль гильз золотниковых ГР. Исследования рабочих процессов золотниковых ГР ЭГУ показали, что такое решение положительно для функционирования РМ, так как сухое трение между золотником и гильзой в них практически полностью замещается вязким [2], а стационарная составляющая гидродинамической силы, действующей на золотниковые плунжеры, существенно уменьшается из-за изменения углов истечения потоков в дроссельных окнах и изменения их проводимости по сравнению с ГР, имеющими стационарные гильзы [6, 7]. Было установлено, что на углы истечения потоков в дроссельных окнах и коэффициенты их расхода влияют такие комплексные безразмерные параметры, как отношение линейной скорости кругового движения средней поверхности гильзы V_r к средней скорости течения потока рабочей жидкости в дроссельном окне V_o и также отношение локальной толщины стенки гильзы в зоне дроссельного окна δ_r к ширине дроссельного окна b [8].

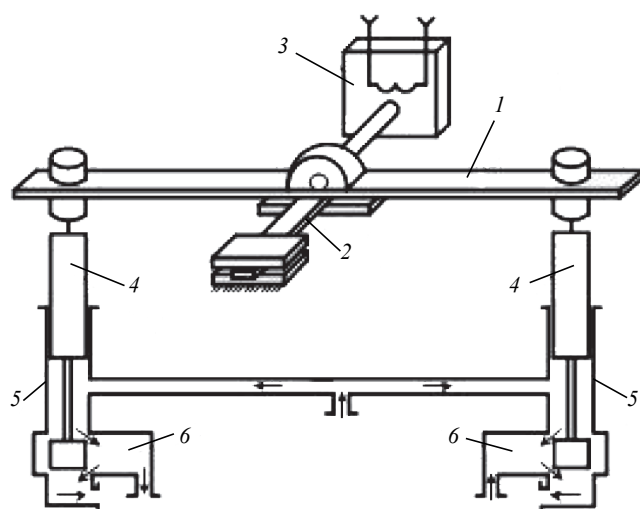


Рис. 1. Схема четырехдроссельного электрогидравлического усилителя: 1 – коромысло; 2 – плоская нагрузочная пружина; 3 – электромеханический преобразователь-поляризованное реле; 4 – золотниковый плунжер; 5 – гильза (ось насоса); 6 – рабочая полость ЭГУ

Постановка задачи

Задача исследований – поиск способов параметрической оптимизации РМ. Важными параметрами для оптимизации РМ являются наклон ее скоростной характеристики и ток трогания. Поэтому целью исследований стало нахождение параметров, влияющих на эти характеристики.

Исследования проводились посредством проведения статического анализа [9]. Для вычислительных экспериментов использовались математические модели статических режимов работы РМ с четырехдроссельным электрогидравлическим усилителем, обеспечивающие погрешность расчетов статических характеристик не более $\pm 2\%$ в широком диапазоне температур и напряжений питания РМ [10].

В экспериментах исследовалось влияние на статические характеристики РМ вариаций следующих параметров:

– относительного коэффициента упругости плоской нагрузочной пружины УУ ЭГУ $\overline{K_{мп}}$, определяемого как $\overline{K_{мп}} = K_{мп} / K_{мп}^H$, где $K_{мп}$ – коэффициент упругости плоской нагрузочной пружины и $K_{мп}^H$ – его номинальное значение;

– относительного начального открытия сливных дроссельных окон $\overline{X_{30}}$, определяемого как $\overline{X_{30}} = X_{30} / X_{30}^H$, где X_{30} – начальное открытие сливных дроссельных окон и X_{30}^H – его номинальное значение;

– относительной ширины дроссельных отверстий в гильзе \overline{b} при фиксированных начальных площадях дроссельных окон, определяемой как $\overline{b} = b / b^H$, где b – ширина дроссельных отверстий в гильзе и b^H – её номинальное значение;

– относительной локальной толщины стенки гильзы в зоне дроссельного отверстия $\overline{\delta_r}$, определяемой как $\overline{\delta_r} = \delta_r / \delta_r^H$, где δ_r – локальная толщина стенки гильзы в зоне дроссельного отверстия и δ_r^H – её номинальная локальная толщина.

Описание исследований

В исследованиях определялось влияние указанных параметров на следующие статические характеристики РМ:

– скоростную характеристику РМ $V_{п} = f(i_k)$ при противодействующей нагрузке на штоке 1000 Н, где $V_{п}$ – скорость движения поршня РМ, i_k – командный ток;

– силовую характеристику РМ $F_{п} = f(i_k)$, где $F_{п}$ – усилие, развиваемое штоком поршня РМ;

– зависимость гидравлической силы F_r , действующей на золотниковые плунжеры, от перемещения золотникового плунжера X_3 при противодействующей нагрузке на штоке 1000 Н и при полностью заторможенном поршне $F_r = f(X_3)$.

Результаты вычислительных экспериментов и анализ влияния параметров

Влияние относительного коэффициента упругости плоской нагрузочной пружины узла управления ЭГУ $\overline{K_{мп}}$ на статические характеристики РМ иллюстрируется рис. 2, на котором представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных при вариации указанного параметра.

Анализ влияния параметра $\overline{K_{мп}}$

Из статических характеристик РМ (рис. 2а) видно, что вариация параметра $\overline{K_{мп}}$ приводит к одновременному смещению скоростной характеристики по оси i_k и изменению угла ее наклона к этой оси, при этом уменьшение $\overline{K_{мп}}$ приводит к уменьшению тока трогания РМ, которое сопровождается увеличением угла наклона скоростной характеристики. Увеличение $\overline{K_{мп}}$ приводит к росту тока трогания, которое сопровождается уменьшением угла наклона скоростной характеристики, то есть приводит к обратному

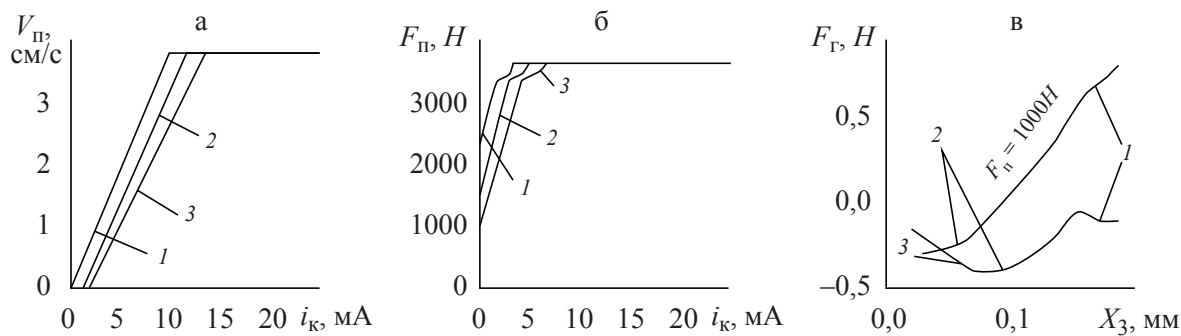


Рис. 2. Влияние $\overline{K_{МП}}$ на статические характеристики РМ: а – влияние $\overline{K_{МП}}$ на $V_{п} = f(i_{к})$; б – влияние $\overline{K_{МП}}$ на $F_{п} = f(i_{к})$; в – влияние $\overline{K_{МП}}$ на $F_{г} = f(X_3)$: 1 – $\overline{K_{МП}} = 0.666$; 2 – $\overline{K_{МП}} = 1.000$; 3 – $\overline{K_{МП}} = 1.333$

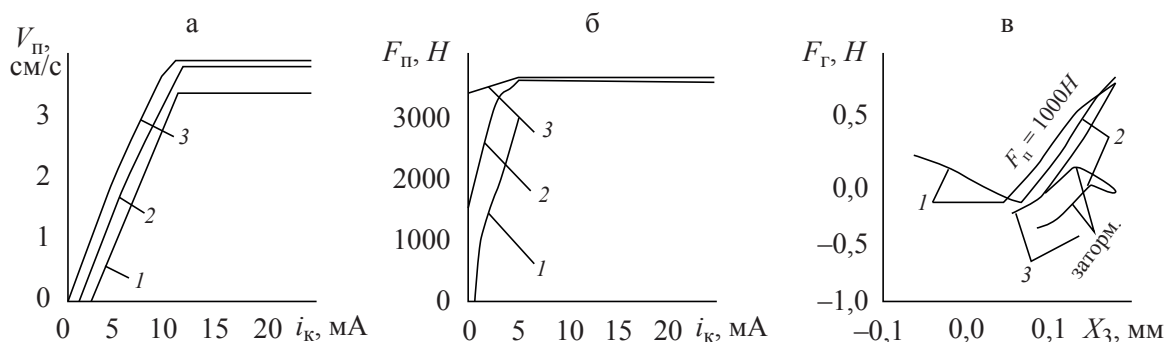


Рис. 3. Влияние $\overline{X_{30}}$ на статические характеристики РМ: а – влияние $\overline{X_{30}}$ на $V_{п} = f(i_{к})$; б – влияние $\overline{X_{30}}$ на $F_{п} = f(i_{к})$; в – влияние $\overline{X_{30}}$ на $F_{г} = f(X_3)$: 1 – $\overline{X_{30}} = 0.875$; 2 – $\overline{X_{30}} = 1.000$; 3 – $\overline{X_{30}} = 1.125$

эффекту. Из графиков статических характеристик рис. 2б видно, что вариация параметра $\overline{K_{МП}}$ приводит к практически параллельному смещению силовой характеристики РМ вдоль оси $i_{к}$. Из зависимостей $F_{г} = f(X_3)$ рис. 2в можно видеть, что вариация параметра $\overline{K_{МП}}$ практически не влияет на значения гидравлической силы при противодействующей нагрузке на штоке РМ 1000 Н. Из графиков зависимостей $F_{г} = f(X_3)$ при заторможенном поршне видно, что характеристики не выходят из начала координат, то есть РМ не имеет статической устойчивости, золотниковые плунжеры РМ при наличии малейшего командного сигнала сваливаются в некоторое равновесное состояние, смещенное относительно начала координат на некоторое расстояние. При этом увеличение параметра $\overline{K_{МП}}$ уменьшает это смещение.

Влияние относительного начального открытия сливных дроссельных окон $\overline{X_{30}}$ на статические характеристики РМ показано на рис. 3, где представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных при вариации указанного параметра.

Анализ влияния параметра $\overline{X_{30}}$

Как видно из графиков статических характеристик РМ, представленных на рис. 3а, вариация параметра $\overline{X_{30}}$ приводит к практически параллельному смещению скоростной характеристики РМ вдоль оси $i_{к}$ без изменения ее угла наклона к оси $i_{к}$, при этом уменьшение $\overline{X_{30}}$ приводит к росту тока трогания РМ, увеличение $\overline{X_{30}}$ – к его уменьшению. Из графиков статических характеристик рис. 3б видно, что уменьшение параметра $\overline{X_{30}}$ приводит к возникновению зоны нечувствительности силовой характеристики, увеличение параметра $\overline{X_{30}}$ – к крутому нарастанию развиваемой РМ силы.

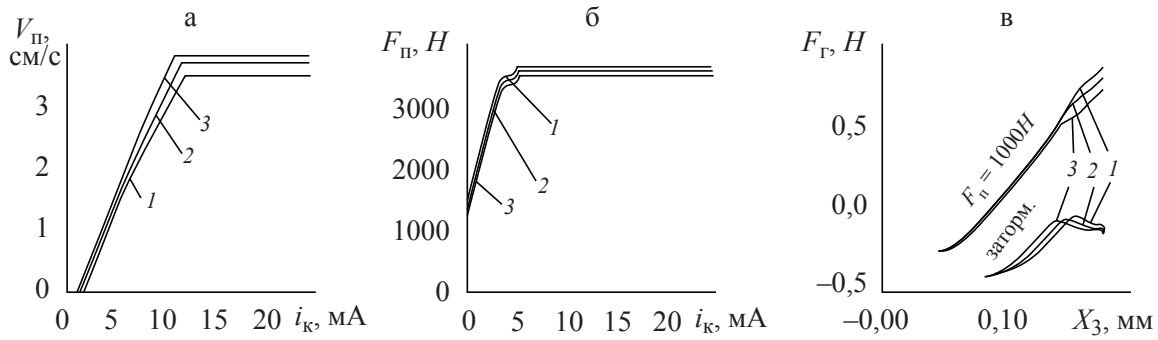


Рис. 4. Влияние \bar{b} на статические характеристики РМ: а – влияние \bar{b} на $V_n = f(i_k)$; б – влияние \bar{b} на $F_n = f(i_k)$; в – влияние \bar{b} на $F_r = f(X_3)$: 1 – $\bar{b} = 0.952$; 2 – $\bar{b} = 1.000$; 3 – $\bar{b} = 1.047$

Рассмотрев графики зависимостей $F_r = f(X_3)$ рис. 3в, можно отметить, что увеличение параметра \bar{X}_{30} при противодействующей нагрузке на штоке РМ 1000 Н приводит к росту по модулю отрицательной гидравлической силы, действующей на золотниковые плунжеры, уменьшение параметра \bar{X}_{30} – к уменьшению по модулю значений этой силы. Графики зависимостей $F_r = f(X_3)$ при заторможенном поршне показывают, что при уменьшении параметра \bar{X}_{30} золотниковые плунжеры сваливаются в сторону, противоположную стороне, в которую они сваливаются при номинальном и увеличенном значении параметра \bar{X}_{30} .

Влияние относительной ширины дроссельных отверстий в гильзе \bar{b} при фиксированных начальных площадях дроссельных окон на статические характеристики РМ приведено на рис. 4, где представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных при вариации указанного параметра.

Анализ влияния параметра \bar{b}

Статические характеристики РМ на рис. 4а показывают, что вариация параметра \bar{b} приводит к одновременному смещению скоростной характеристики по оси i_k и изменению угла ее наклона к этой оси, при этом уменьшение \bar{b} приводит к увеличению тока трогания РМ, которое сопровождается уменьшением угла наклона скоростной характеристики, увеличение \bar{b} приводит к уменьшению тока трогания, которое сопровождается увеличением угла наклона скоростной характеристики, то есть приводит к обратному эффекту. Из графиков рис. 2б видно, что вариация параметра \bar{b} приводит к незначительному параллельному смещению силовой характеристики РМ вдоль оси i_k . Зависимости $F_r = f(X_3)$ рис. 4в показывают, что при противодействующей нагрузке на штоке РМ 1000 Н влияние параметра \bar{b} на гидравлическую силу незначительно, при заторможенном поршне уменьшение параметра \bar{b} приводит к росту по модулю отрицательной

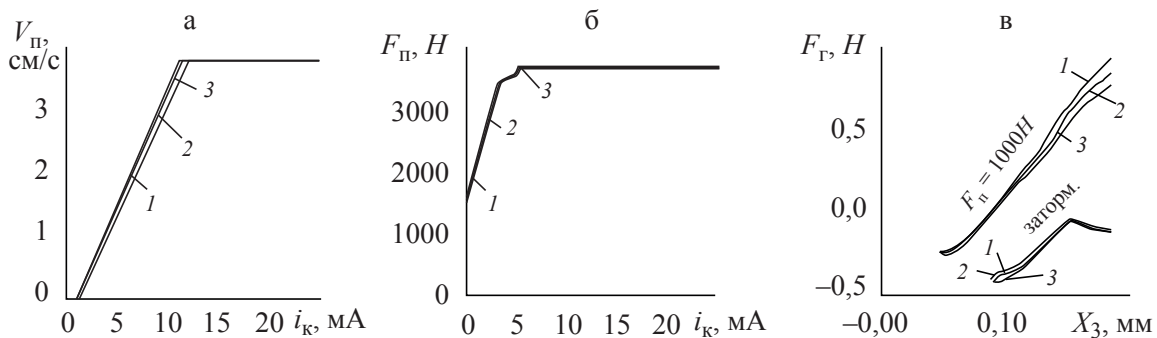


Рис. 5. Влияние $\bar{\delta}_r$ на статические характеристики РМ: а – влияние $\bar{\delta}_r$ на $V_n = f(i_k)$; б – влияние $\bar{\delta}_r$ на $F_n = f(i_k)$; в – влияние $\bar{\delta}_r$ на $F_r = f(X_3)$: 1 – $\bar{\delta}_r = 0.666$; 2 – $\bar{\delta}_r = 1.000$; 3 – $\bar{\delta}_r = 1.333$

гидравлической силы, действующей на золотниковые плунжеры, увеличение параметра \bar{b} приводит к уменьшению по модулю значений этой силы.

Влияние относительной локальной толщина стенки гильзы в зоне дроссельного отверстия $\bar{\delta}_r$ на статические характеристики РМ показано на рис. 5, здесь представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных при вариации указанного параметра.

Анализ влияния параметра $\bar{\delta}_r$

Из рис. 5а видно, что вариация параметра $\bar{\delta}_r$ приводит только к изменению угла наклона скоростной характеристики к оси i_k , при этом уменьшение $\bar{\delta}_r$ приводит к уменьшению угла наклона скоростной характеристики, увеличение $\bar{\delta}_r$ приводит к обратному эффекту. Из статических характеристик на рис. 5б видно, что вариация параметра $\bar{\delta}_r$ приводит к незначительному параллельному смещению силовой характеристики РМ вдоль оси i_k . Графики зависимостей $F_r = f(X_3)$ рис. 5в показывают, что при противодействующей нагрузке на штоке РМ 1000 Н уменьшение параметра $\bar{\delta}_r$ приводит к росту по модулю отрицательной гидравлической силы, действующей на золотниковые плунжеры, увеличение параметра $\bar{\delta}_r$ – к уменьшению по модулю значений этой силы, при затор-моженном поршне влияние параметра $\bar{\delta}_r$ на гидравлическую силу аналогично влиянию при противодействующей нагрузке на штоке РМ 1000 Н.

Обсуждение результатов исследований

В результате проведенных исследований установлено, что РМ с четырехдроссельным ЭГУ не имеет статической устойчивости, и одна из целей оптимизации РМ – повышение ее устойчивости. Анализ влияния на статические характеристики РМ вариаций исследованных параметров показывает, что повысить статическую устойчивость РМ можно увеличением относительного коэффициента упругости плоской нагрузочной пружины узла управления ЭГУ $\bar{K}_{мп}$ при увеличении относительной ширины дроссельных отверстий в гильзе \bar{b} и фиксированных начальных площадях дроссельных окон. Начальная лабораторная отработка РМ показала, что в этом случае для обеспечения статических характеристик РМ значительно уменьшается величина перемещения золотниковых плунжеров. Эта величина сопоставима с величиной колебаний золотниковых плунжеров в условиях вибрации, ударов и линейных ускорений, что делает РМ практически неуправляемой.

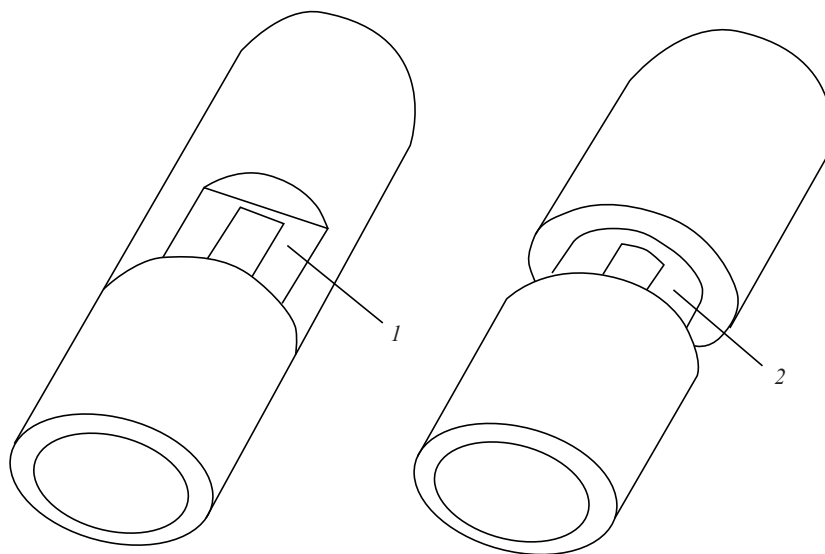


Рис. 6. Конструктивно-технические решения гильз: 1 – паз (патент RU2240260 C2); 2 – кольцевая канавка (патент RU2293687 C2)

В проведенных исследованиях установлено, что вариация параметра $\overline{\delta_r}$ приводит исключительно к изменению угла наклона скоростной характеристики к оси i_k . Следовательно, с помощью вариации этого параметра можно регулировать угол наклона скоростной характеристики РМ, ее коэффициент усиления.

Для практической реализации полученного результата исследований предложены новые конструктивно-технические решения РМ – вращающиеся гильзы золотниковых плунжеров ЭГУ в зоне дроссельных отверстий содержат пазы [11] (рис. 6 а) или кольцевые канавки [12] (рис. 6 б), уменьшающие локальную толщину стенок вращающихся гильз. В результате их воздействие на потоки в дроссельных окнах ослабляется и способствует увеличению гидравлической силы, действующей на золотниковые плунжеры, за счет этого уменьшается угол наклона скоростной характеристики РМ.

Указанные конструктивно-технические решения были внедрены при производстве рулевых машин, устанавливаемых в маршевые двигатели разгонных блоков типа Д и ДМ [13]. Внедрение этих решений в производство подтвердило результаты исследований и позволило существенно облегчить регулировку РМ в цехе-изготовителе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге проведенных в работе исследований получены следующие результаты:

- установлено, что РМ с четырехдроссельным ЭГУ не имеет статической устойчивости;
- установлено, что на угол наклона скоростной характеристики РМ наибольшее влияние оказывают вариации следующих параметров:

относительной локальной толщины стенки гильзы в зоне дроссельного отверстия;

относительной ширины дроссельных отверстий в гильзе при фиксированных начальных площадях дроссельных окон;

относительного коэффициента упругости плоской нагрузочной пружины узла управления ЭГУ.

Влияние относительной локальной толщины стенки гильзы в зоне дроссельного отверстия на наклон скоростной характеристики РМ носит исключительный характер. Изменяя этот параметр можно регулировать угол наклона скоростной характеристики РМ, то есть изменять ее коэффициент усиления.

Установлено, что на величину тока трогания РМ наибольшее влияние оказывают вариации относительного коэффициента упругости плоской нагрузочной пружины узла управления ЭГУ и относительного начального открытия сливных дроссельных окон.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что для управления наклоном скоростной характеристики РМ предложены конструктивно-технические решения РМ, заключающиеся в том, что вращающиеся гильзы золотниковых плунжеров ЭГУ (оси ведомых шестерен трехшестеренного насоса) в зоне дроссельных отверстий содержат или пазы или кольцевые канавки, уменьшающие локальную толщину стенок вращающихся гильз, в результате чего их воздействие на потоки в дроссельных окнах ослабляется, способствуя увеличению гидравлической силы, действующей на золотниковые плунжеры, благодаря этому уменьшается угол наклона скоростной характеристики РМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kudryavtsev V.V., Stepan G.A., Shutenko V.I., Chertok B.E. The rocket steering actuators // IAC'94 Intern. Aerospace Congress. Theory, Applications, Technologies. Abstracts. August 15–19, 1994. Moscow, Russia.
2. Белоногов О.Б., Жарков М.Н., Кудрявцев В.В., Степан Г.А., Черток Б.Е., Шутенко В.И. Особенности схемно-конструктивных решений и функционирования

- электрогидравлических рулевых машин ракет (краткий технико-исторический обзор) // Ракетно-космическая техника. 1998. Сер. XII. Вып. 3–4. С. 3–25.
3. *Taft C.K., Twill J.P.* An Analysis of the Three-Way Underlepped Hydraulic Spool Servovalve // Transaction of ASME. J. of Dynamic Systems, Measurment, and Control. V. 100. 1978. June. P. 117–123.
 4. *Weule H.* Eine Durchflubgleichung fur den laminar-turbulenten Stromungsbereich // Olhydraulik und Pneumatik. 1974. V. 18. № 1. S. 57–67.
 5. *Backe W.* Systematik der hydraulischen Widerstandsschaltungen in Ventilen und Regelkreisen. Mainz: Krausskopf-Verlag GmbH, 1974. 223 s.
 6. *Белоногов О.Б.* Экспериментальные исследования и идентификация углов истечения потоков в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей рулевых машин ракет // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 1. С. 35–48.
 7. *Белоногов О.Б.* Экспериментальные исследования и метод идентификации безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 43–57.
 8. *Белоногов О.Б.* Экспериментальные исследования истечения и безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей с вращающимися гильзами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 5. С. 4–23.
 9. *Белоногов О.Б.* Итерационные методы статического анализа двухдроссельной электрогидравлической рулевой машины ракетных блоков // Космическая техника и технологии. 2018. № 2.
 10. *Белоногов О.Б., Жарков М.Н., Кудрявцев В.В., Шутенко В.И.* Методы расчета статических характеристик автономных однокаскадных четырехдроссельных рулевых машин // Ракетно-космическая техника. 1998. Сер. XII. Вып. 3–4. С. 178–217.
 11. Патент РФ 2131827. Рулевая машина. О.Б. Белоногов, В.В. Чеканов // Бюллетень. 1999. № 17.
 12. Патент РФ 2293687. Рулевая машина. О.Б. Белоногов, В.В. Чеканов // Бюллетень. 2007. № 5.
 13. *Вачнадзе В.Д., Овечко-Филиппов Э.В., Смоленцев А.А., Соколов Б.А.* Разработка, этапы модернизации и итоги пятидесятилетней эксплуатации первого отечественного жидкостного ракетного двигателя замкнутой схемы // Космическая техника и технологии. 2015. № 2. С. 82–90.

УДК 629.78.064.52:621.314.671

**О РАСЧЕТЕ НАПРЯЖЕНИЯ ЗАЖИГАНИЯ ОБРАТНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА
В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ПЛАЗМЕННОМ ТЕРМОЭМИССИОННОМ ДИОДЕ**

© 2018 г. Е.В. ОНУФРИЕВА¹, В.В. ОНУФРИЕВ¹, Ю.М. ГРИШИН¹,
Н.И. СИДНЯЕВ¹, В.В. СИНЯВСКИЙ², А.Б. ИВАШКИН¹

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва

²Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва, Королев МО

E-mail: Onufryev@bmstu.ru

Разработка мощных энергодвигательных установок (ЭДУ) для космических аппаратов связана с созданием высокотемпературных радиационно-стойких систем преобразования тока (СПТ), выполненных на термоэмиссионных приборах плазменной электроэнергетики – сеточных ключевых элементах (СКЭ) и высоковольтных плазменных термоэмиссионных диодах (ВПТД). СПТ необходима для согласования электрических параметров термоэмиссионного реактора-преобразователя (выходное напряжение 120–150 В) с параметрами электроракетного двигателя (рабочее напряжение сотни – тысячи вольт).

В этой связи актуален вопрос расчета напряжения зажигания обратного дугового разряда в межэлектродном зазоре (МЭЗ) ВПТД. В работе получена полуэмпирическая зависимость для расчета напряжения зажигания обратного дугового разряда в зависимости от давления пара цезия в МЭЗ и температуры анода. Полученная зависимость может быть использована разработчиками приборов термоэмиссионной плазменной электроэнергетики.

Ключевые слова: межэлектродный зазор, высоковольтный плазменный термоэмиссионный диод, напряженность электрического поля, напряжение зажигания обратного дугового разряда, давление пара.

**ABOUT CALCULATION THE VOLTAGE OF IGNITION OF BACK ARC –
DISCHARGE INTO HIGH-VOLTAGE PLASMA THERMION DIODE**

E.V. ONUFRIEVA², V.V. ONUFRIEV^{2*}, YU.M. GRISHIN²,
N.I. SIDNYAEV², V.V. SINYAVSKY¹, A.B. IVASHKIN²

¹Moscow state technical university named N.E. Bauman, Moscow

²S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (RSC Energia), Korolyov MR.

E-mail: Onufryev@bmstu.ru

The development of the spacecraft power unit for the spacecraft engines is associated with creation of the high – temperature radiation resistant systems of the system of current converters such as grid – controlled rectifiers and high voltage plasma thermionic diodes. The system of current converter is required to match the electrical parameters of the thermionic conversion power reactor (with output voltage of 120–150 V) to the parameters of the electric engine with operating voltage of hundreds – thousands of volts.

In this connection the computations of the ignition voltage of the back arc – discharge in the interelectrode gap of the high voltage plasma thermionic diode are relevant and essential. In this paper, a semi empirical relation is obtained for computation of the ignition voltage of the back arc – discharge, depending on the vapor pressure of cesium in the interelectrode gap and the anode temperature. The obtained results can be implemented for the future development of devices of thermionic plasma power industry.

Keywords: interelectrode gap, high voltage plasma thermionic diode, electric field strength, ignition voltage of the back arc – discharge, vapor pressure.

ВВЕДЕНИЕ

Важным элементом мощных космических энергодвигательных установок (ЭДУ) [1] с низковольтным источником тока (термоэмиссионным реактором-преобразователем (ТРП) или солнечной батареей) и электроракетной двигательной установкой является высокотемпературная система преобразования тока (СПТ), выполненная на основе приборов термоэмиссионной плазменной электроэнергетики [2–5].

В СПТ используются сеточные ключевые элементы (СКЭ) в инверторной части и высоковольтные плазменные термоэмиссионные диоды (ВПТД) в выпрямительной части преобразователя тока [5]. Особенностью применения ВПТД с цезиевым и (или) бариевым наполнением являются низкие потери напряжения в проводящем состоянии ($\delta U_p = 2,5...3,5$ В) при величине рабочего напряжения вентиля 1000–2500 В и высокая удельная электрическая мощность, передаваемая на нагрузку (10–50 кВт/см²). Рабочая температура анода ВПТД $T_A = 600...900$ К позволяет использовать его в СПТ, расположенной в высокотемпературной части ЭДУ (рис. 1) в отличие от существующих и перспективных полупроводниковых вентилях; причем ВПТД является радиационно-стойким элементом и не требует гермоконтейнера.

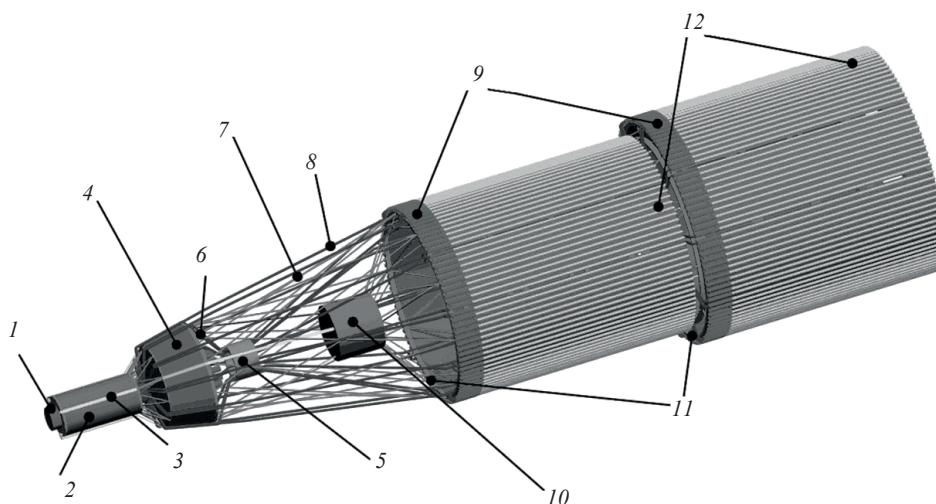


Рис. 1. Схема термоэмиссионной ЯЭУ для межорбитального буксира “Геркулес” [6]: 1 – блок генераторов пара цезия и системы удаления газообразных продуктов деления модулей; 2 – ТРП модульной схемы; 3 – многослойная радиационная защита; 4 – силовоточная шина; 5 – многоканальный МГД-насос с общей магнитной системой всех модулей; 6 – трубопровод литиевой системы охлаждения на входе в модуль термоэмиссионного реактора-преобразователя; 7 – опорная ферма; 8 – трубопровод литиевой системы охлаждения на выходе из модуля термоэмиссионного реактора-преобразователя; 9 – теплообменник литий – натрий зоны испарения тепловой трубы; 10 – силовой преобразовательный блок; 11 – опорное кольцо (раздвижная ферма полезной нагрузки не показана); 12 – зона конденсации тепловых труб холодильника-излучателя

Как показали экспериментальные исследования рабочего процесса и энергофизических характеристик ВПТД [6–12] в режиме обратного тока (анод имеет отрицательный потенциал, термоэмиссионный катод – положительный) в МЭЗ горит плотный тлеющий разряд. Именно величина максимального напряжения тлеющего разряда в МЭЗ ВПТД характеризует вентильные свойства диода. Получение зависимостей, позволяющих рассчитать параметры разряда в режиме обратного тока и рабочего напряжения (которое не превышает напряжение зажигания обратного дугового разряда в МЭЗ) позволит проводить проектные исследования при разработке ВПТД как элемента высокотемпературного радиационно-стойкого СПТ.

Полуэмпирическая модель расчета напряжения зажигания обратного дугового разряда в межэлектродном зазоре высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода

Выбор комбинации параметров ВПТД с цезиевым наполнением: температуры термоэмиссионного катода T_K , анода T_A , давления пара цезия p_{Cs} и длины МЭЗ $\Delta_{МЭЗ}$ должен обеспечивать устойчивое распределение потенциала в плотном тлеющем разряде в паре цезия [4, 7–9] в условиях, когда слаботочное состояние (ток разряда $I_{обр} = 1...10$ мА, плотность тока разряда $j_{обр} = 1...7$ мА/см²) сохраняется при напряжениях $\delta U_p = 1000...2500$ В.

Результаты расчетов температуры пара в ионном слое в режиме обратного тока $T_a(d_K)$ позволили увязать температуру пара у поверхности отрицательного электрода (анода) с приложенным к МЭЗ ВПТД напряжением $U_{обр}$ и концентрацией атомов n_a [11]:

$$T_a(d_K) \cong T_a(0) + \frac{\epsilon_0 k e}{\chi_a^2 m_a} n_a U_{обр}^3, \quad (1)$$

где $T_a(0)$ – температура атомов пара в МЭЗ, определяемая в первом приближении как полусумма температур электродов (катода и анода ВПТД); ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; χ_a – коэффициент теплопроводности атомов пара цезия; m_a – масса атома цезия.

Как показали расчеты по выражению (1), пар разогревается у поверхности отрицательного электрода до 4000–6000 К, то есть формируется область возбужденных атомов. В момент развития обратного дугового разряда температура возбужденных атомов в ионном слое (у поверхности отрицательного электрода [11]) достигает некоторой критической величины $T_a^*(d_K)$, при этом напряжение $U_{обр} = U_{проб}$, где $U_{проб}$ – напряжение зажигания обратного дугового разряда (обратного дугового пробоя ВПТД). Таким образом, из выражения (1) можно получить зависимость для расчета напряжения обратного дугового пробоя МЭЗ ВПТД:

$$U_{проб} = \left[\frac{\chi_a^2 m_a}{\epsilon_0 k e} \frac{1}{n_a} (T_a^*(d_K) - T_a(0)) \right]^{1/3}. \quad (2)$$

Выражение (2) можно использовать, если известны две величины: критическая температура атомов в ионном слое $T_a^*(d_K)$ в момент зажигания обратного дугового разряда и χ_a – коэффициент теплопроводности атомов пара цезия. Отсутствие этих величин (особенно данных по температуре атомов пара у поверхности отрицательного электрода) затрудняет использование выражения (2) и требует дополнительных вычислений и данных экспериментального исследования.

Вследствие этого для практических расчетов и проектирования удобно использовать данные экспериментального исследования режима обратного тока и разработанную модель процессов в ионном слое [11], что позволит получить полуэмпирическую зависимость для расчета напряжения зажигания обратного дугового разряда в МЭЗ ВПТД.

Из результатов экспериментального исследования обратных зажигания [4, 7–9] установлено, что при фиксированной величине давления пара в зазоре p_{Cs} и температуре отрицательного электрода T_A (анода ВПТД в режиме обратного тока) напряжение зажигания обратного дугового разряда в пределах погрешности измерений остается постоянным ($U_{проб} = \text{const}$). Это наблюдалось при многократных повторениях измерений

величины $U_{\text{проб}}$ при фиксированных значениях p_{Cs} и T_A [4, 7–9], абсолютное значение напряжения зажигания обратного дугового разряда оставалось постоянным (~ 1000 В), а величина погрешности (измерение проводилось приборами класса точности 0,5) не превышала 1–5 В.

Экспериментально получено, что процесс зажигания обратного дугового разряда в МЭЗ ВПТД имеет закономерный характер в отличие от процесса обратного дугового пробоя газонаполненных вентилях (где он рассматривается статистически [12]). В результате экспериментальных исследований обратных зажиганиях в МЭЗ ВПТД с цезиевым наполнением были получены экспериментальные зависимости:

$$U_{\text{проб}}(p_{Cs}, T_A); U_{\text{проб}}(T_A/T_{Cs}) [4, 7–9].$$

Обратный дуговой пробой – зажигание самостоятельного дугового разряда наступает в момент, когда $U_{\text{обр}}$ становится равным $U_{\text{проб}}$, при этом напряженность электрического поля у поверхности анода достигает некоторого значения $E^*(d_K)$ [12, 13].

Запишем уравнение токопереноса на границе «анод – слой», полагая, что основной составляющей токопереноса в ионном слое является ток ионов:

$$j_i(d_K) = en_i(d_K)v_i(d_K), \quad (3)$$

где концентрация ионов $n_i(d_K)$ у поверхности анода может быть найдена из уравнения Пуассона; $v_i(d_K)$ – скорость ионов у поверхности анода:

$$V_i(d_K) = \left(\frac{2^{1/2} e \lambda_{ia} E^*(d_K)}{m_a} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

Так как в ионном слое тлеющего разряда выполняется условие:

$$n_a \gg n_i \gg n_e,$$

величину концентрации ионов у поверхности отрицательного электрода $n_i(d_K)$ для предпробойного состояния МЭЗ ВПТД можно определить непосредственно из уравнения Пуассона:

$$\left(\frac{dE^*}{dx} \right)_{x=d_K} \simeq -\frac{e}{\epsilon_0} n_i(d_K). \quad (5)$$

Таким образом, получим величину концентрации ионов у поверхности отрицательного электрода $n_i(d_K)$ в виде:

$$n_i(d_K) = -\frac{\epsilon_0}{e} \left(\frac{dE^*}{dx} \right)_{x=d_K}. \quad (5^*)$$

Применяя аналитическую модель процессов в ионном слое [11], величину градиента напряженности электрического поля у поверхности отрицательного электрода (анода) в режиме обратного тока можно определить как:

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{x=d_K} \cong - \left[\frac{2}{5} \frac{k}{\chi_a} \left(\frac{2^{1/2} e n_a^3 Q_{ia}}{m_a} \right)^{1/2} \right]^{1/2} (E^*(d_K))^{5/4}. \quad (6)$$

а выражение (3) для плотности предпробойного тока, с учетом сказанного, записать в виде:

$$j_i(d_K) = \varepsilon_0 \frac{2^{7/8} k^{1/2} e^{3/4} n_a^{1/4}}{5^{1/2} Q_{ia}^{1/4} \chi_a^{1/2} m_a^{3/4}} (E^*(d_K))^{7/4}. \quad (3^*)$$

Используя связь между $E^*(d_K)$ и напряжением зажигания обратного дугового разряда $U_{\text{проб}}$ [11], имеем:

$$(E^*(d_K))^{7/4} = \frac{U_{\text{проб}}^{7/3} \left(\frac{2k}{5\chi_a}\right)^{7/6} \left(\frac{2^{1/2} e n_a^3 Q_{ia}}{m_a}\right)^{7/12}}{4^{7/3}}, \quad (7)$$

выражение (3*) запишем в виде:

$$j_{\text{кр}} = \varepsilon_0 \frac{2^{-7/3} k^{5/3} e^{4/3} Q_{ia}^{1/3}}{5^{5/3} \chi_a^{5/3} m_a^{4/3}} U_{\text{проб}}^{7/3} n_a^2. \quad (8)$$

Для учета электронного тока от анода (в режиме тлеющего разряда МЭЗ ВПТД), обусловленного процессами вторичной электронной и термоэлектронной эмиссии с его поверхности, введен эмпирический коэффициент γ_i^* . В результате выражение для предпробойной плотности тока $j_{\text{кр}}$ в МЭЗ примет окончательный вид:

$$j_{\text{кр}} = (1 + \gamma_i^*) \left[\varepsilon_0 \left(\frac{2^{-7/3}}{5^{5/3}}\right) \left(\frac{k}{\chi_a}\right)^{5/3} \left(\frac{e}{m_a}\right)^{4/3} Q_{ia}^{1/3} \right] U_{\text{проб}}^{7/3} n_a^2. \quad (9)$$

Это уравнение позволяет рассчитать величину напряжения зажигания обратного дугового разряда в МЭЗ ВПТД (в режиме обратного тока) в зависимости от концентрации атомов пара цезия n_a и плотности предпробойного тока $j_{\text{кр}}$. Согласно экспериментальным данным [4, 7–9] величина $j_{\text{кр}}$ мало изменяется в диапазоне давлений пара 0,133–13,3 Па и приблизительно равна 5–7 мА/см².

Это наглядно видно из вольтамперных характеристик (ВАХ) ВПТД в режиме обратного тока (рис. 2): ВАХ имеет участок насыщения в предпробойном состоянии. Поэтому $j_{\text{кр}}$ в уравнении (9) может рассматриваться как известный параметр.

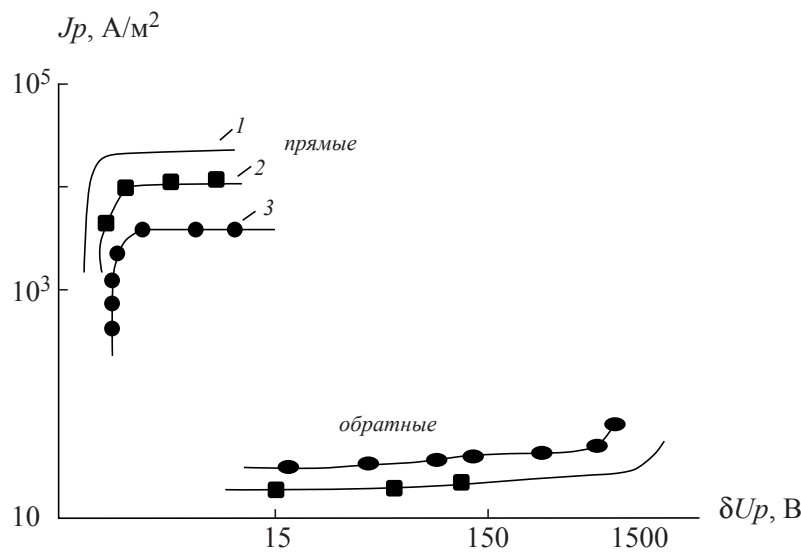


Рис. 2. Вольтамперные характеристики ВПТД [5]: электроды – тантал; 1 – $T_A = 704$ К, $p_{Cs} = 10.5$ Па, $U_{\text{проб}} = 1211$ В; 2 – $T_A = 733$ К, $p_{Cs} = 10,5$ Па, $U_{\text{проб}} = 927$ В; 3 – $T_A = 751$ К, $p_{Cs} = 6.3$ Па, $U_{\text{проб}} = 1206$ В

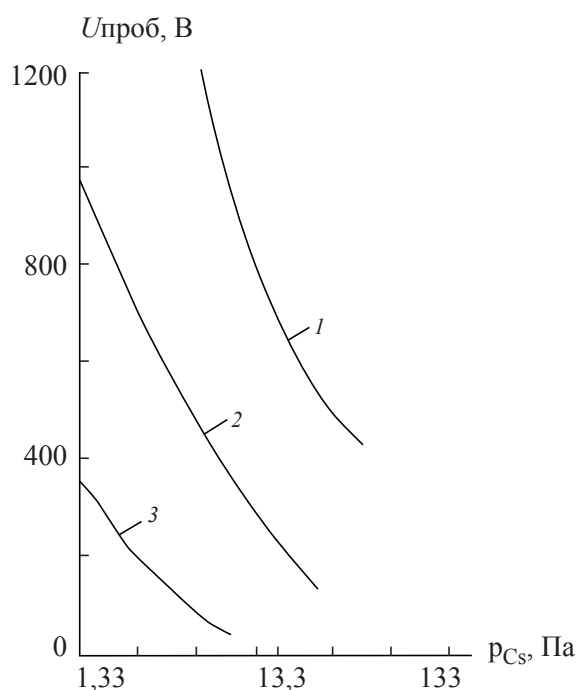


Рис. 3. Расчетные зависимости напряжения зажигания обратного дугового разряда в МЭЗ цезиевого ВПТД: 1 – $T_A = 580$ К; 2 – $T_A = 650$ К, 3 – $T_A = 700$ К

С учетом малости концентраций заряженных частиц в прианодном слое значение коэффициента теплопроводности $\chi_a(T_a)$ определено в рамках модели Чепмена – Каулинга для разреженного чистого газа по классической формуле [14]:

$$\chi_a(T_a) = \frac{75}{64} \left(\frac{\pi k^3 T_a}{m_a} \right)^{1/2} \frac{1}{\bar{\Omega}^{(2,2)}}, \quad (10)$$

в которой величина столкновительного интеграла $\bar{\Omega}^{(2,2)}$ для паров цезия как функция температуры T_a из диапазона 5000–10000 К приведена в работе [15].

При известной величине $j_{кр} = 6$ мА/см² выражение (9) является полуэмпирической формулой для расчета основных вентильных свойств ВПТД:

$$j_{кр} = C_1 U_{проб}^{7/3} n_a^2, \quad (11)$$

где $C_1 = \left(1 + \gamma_i^* \right) \left[\epsilon_0 \left(\frac{2^{-7/3}}{5^{5/3}} \right) \left(\frac{k}{\chi_a} \right)^{5/3} \left(\frac{e}{m_a} \right)^{4/3} Q_{ia}^{1/3} \right]$.

Концентрация атомов пара может быть получена из уравнения состояния на основе экспериментальных данных по давлению пара в МЭЗ.

Расчеты напряжения зажигания обратного дугового разряда по зависимости (11) с учетом изменения коэффициента вторичной электронной эмиссии с поверхности анода от его температуры приведены на рис. 3. Видно, что результаты расчетов по (11) достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными [4, 7–10].

Результаты экспериментов [4, 7–10] подтверждают зависимость (11), при этом увеличение давления пара цезия в МЭЗ на порядок (1,33–13,3 Па) при фиксированной температуре отрицательного электрода приводило к снижению величины пробойного напряжения МЭЗ в 50–100 раз. Непроводящее слаботочное состояние МЭЗ ВПТД сохранялось при 400–1500 В, $p_{Cs} = 1 \dots 13$ Па и $T_A = 600 \dots 700$ К.

Анализ полученных результатов

Явление пробоя в приэлектродных слоях при протекании тока (переход из слаботочной формы в самостоятельный дуговой разряд) рассматривалось в [16]. Но, в настоящей работе впервые рассмотрена задача зажигания обратного дугового разряда из плотного тлеющего в приэлектродном слое (у отрицательного электрода) с учетом в нем тепловыделения. Показано, что устойчивость существования тлеющего разряда в МЭЗ ВПТД обусловлена соблюдением теплового баланса области возбужденных атомов вблизи поверхности отрицательного электрода. При его нарушении разряд переходит в самостоятельный дуговой, что наблюдалось экспериментально в [4, 7–10]. Результаты экспериментального исследования показали, что величина напряжения зажигания обратного дугового разряда определялась давлением пара в МЭЗ и температурой отрицательного электрода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен полуэмпирический подход к решению задачи о зажигании обратного дугового разряда в приэлектродном ионном слое тлеющего разряда в высоковольтном плазменном термоэмиссионном диоде.

Получено аналитическое решение и полуэмпирическая зависимость для расчета напряжения зажигания обратного дугового разряда в межэлектродном зазоре высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода с цезиевым наполнением.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании ВПТД и СКЭ мощных высокотемпературных радиационно-стойких систем преобразования тока для космических ЭДУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Островский В.Г., Синявский В.В., Сухов Ю.И.* Межорбитальный электроракетный буксир «Геркулес» на основе термоэмиссионной ядерно-энергетической установки // «Космонавтика и ракетостроение». 2016. № 2 (87). С. 68–74.
2. *Онуфриев В.В., Гришин С.Д., Марахтанов М.К., Синявский В.В.* Выбор параметров систем преобразования тока в космических ЯЭУ большой мощности // Атомная энергия. 2000. Т. 89. Вып.1. С. 78–81.
3. *Лошкарев А.И., Онуфриев В.В., Синявский В.В.* Электроэнергетические характеристики термоэмиссионного высоковольтного диода космических энергодвигательных установок // Изв. РАН. Энергетика 2006. № 1. С. 87–97.
4. *Онуфриев В.В., Лошкарев А.И., Синявский В.В.* Электроэнергетические характеристики термоэмиссионного высоковольтного диода для космических энергодвигательных установок // Изв. РАН. Энергетика. 2006. № 1. С. 87–97.
5. *Онуфриева Е.В., Синявский В.В., Онуфриев В.В.* Высокотемпературные системы преобразования тока перспективных космических энергодвигательных установок // Изв. РАН. Энергетика. 2009. № 4. С. 137–144.
6. *Синявский В.В.* Ядерная энергетика в околоземном космосе // Земля и Вселенная. 2015. № 3. С. 36–47.
7. *Онуфриев В.В., Гришин С.Д.* Экспериментальное исследование электрической прочности к обратному дуговому пробою термоэмиссионного диода с цезиевым наполнением // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34. № 3. С. 482–485.
8. *Onufriyev V.V.* The Results of Investigations of High Temperature High Voltage Thermion Diode // Proceed. Intern. Energy Conversion Engin. Conf. (IECEC2000). Las Vegas (NV), 2000. P. 290–296.

9. *Онуфриев В.В., Лошкарев А.И.* Зажигание обратного дугового разряда в цезиевом термоэмиссионном диоде // Вестник МГТУ. Естественные науки. 2003. № 2. С. 90–102.
10. *Онуфриев В.В., Лошкарев А.И.* Зажигание обратного дугового разряда в бариевом термоэмиссионном диоде // Вестник МГТУ. Естественные науки. 2005. № 1. С. 72–77.
11. *Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Гришин Ю.М., Сидняев Н.И., Синявский В.В., Ивашкин А.Б.* О расчете характеристик разряда в высоковольтном плазменном термоэмиссионном диоде в режиме обратного тока // Изв. РАН. Энергетика. 2017. № 6. С. 87–96.
12. *Грановский В.Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 543 с.
13. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 2009. 736 с.
14. *Гирифельдер Дж., Кертис Ч., Берд Д.* Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИЛ. 1961. 915 с.
15. *Davies R.H., Mason E.A., Munn R.J.* High-Temperature Transport Properties of Alkali Metal Vapors // The Physics of Fluids. 1965.V.5. № 3. P. 444–452.
16. *Любимов Г.А.* Приэлектродные слои резкого изменения потенциала на «горячих» электродах. (Обзор) // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 4. Вып. 1. С. 120–132.

УДК 62-712.8

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДНЕНАПОРНЫХ УСТАНОВОК ВОЗДУШНОГО ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ КА ПАНЕЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ ПРИ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

© 2018 г. А.А. БАСОВ¹, В.И. ВЕЛЮХАНОВ², К.А. КОПТЕЛОВ²,
А.А. ПАЦИЕВСКИЙ¹

¹*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
г. Королёв, Московская обл., Россия*

²*Общество с ограниченной ответственностью «Фриготрейд», Москва, Россия*

E-mail: post@rsce.ru; post@frigodesign.ru

Рассмотрена задача термостатирования – поддержания температурного режима – космических аппаратов (КА) панельного типа при проведении наземной отработки аппаратов, в том числе при электрических и радиотехнических испытаниях. Предложена система газодинамического охлаждения, состоящая из средненапорной установки воздушного термостатирования, теплоизолированных воздухопроводов и устройства воздухораспределения. Приведены результаты испытаний устройства воздухораспределения, изготовленного из радиопрозрачных материалов, для распределения и подачи охлаждающего воздуха на объект испытаний. Результаты показывают, что использование предлагаемой системы газодинамического охлаждения позволяет выполнить задачу обеспечения теплового режима панельного КА при наземных испытаниях при существенно сниженных расходах подаваемого термостатирующего воздуха с использованием компактных и мобильных средненапорных установок, осуществляющих подготовку и подачу воздуха в воздухораспределитель. Разработанная система газодинамического охлаждения также является легко адаптируемой и может быть использована для термостатирования при проведении наземных испытаний перспективных панельных КА разработки РКК «Энергия».

Ключевые слова: наземное термостатирование, устройство воздухораспределения, панельный космический аппарат, тепловой режим, установка термостатирования.

APPLICATION OF AVERAGE-PRESSURE THERMOSTABILIZATION PLANTS FOR PANEL-BASED SPACECRAFT DURING ON-GROUND TESTS

A.A. BASOV¹, V.I. VELYUKHANOV², K.A. KOPTELOV², A.A. PATSIEVSKIY¹

¹*S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (RSC Energia),
Korolev, Moscow Region, Russia*

²*Limited Company “Frigotrade”, Moscow, Russia*

E-mail: post@rsce.ru; post@frigodesign.ru

The paper refers to thermostabilization problem – maintaining thermal conditions – of the panel-based spacecraft during on-ground tests, including electrical and radiotechnical tests. Gas-dynamic system is being proposed, which consists of an average-pressure

thermostabilization plant, thermal-isolated airways and air-distribution unit. Air-distribution unit testing results are showed. This unit is made of radiolucent material and it carries out air supply and distribution to the testing object. Conducted tests results show that implementation of proposed gas-dynamic cooling system allows maintaining thermal conditions of the panel-based spacecraft during the on-ground tests. It can be done with reduced air consumption and usage of compact and mobile average-pressure thermostabilization plants, concluding air preparation and supply to the air-distribution unit. Gas-dynamic system is also easily adaptable and it can be used for cooling during on-ground tests of RSC Energia perspective panel-based spacecraft.

Keywords: on-ground thermostabilization, air-distribution unit, panel-based spacecraft, thermal conditions, thermostabilization plant.

Наземное термостатирование панельных КА при проведении наземных испытаний

При наземных испытаниях космических аппаратов (КА) отвод избыточного тепла, выделяемого приборно-агрегатным оборудованием, осуществляется бортовой жидкостной системой терморегулирования, отдающей тепло наземной системе жидкостного термостатирования, или тепловыделяющее оборудование обдувается холодным воздухом, подаваемым в отсек воздухопроводом системы воздушного термостатирования [1]. При наземных испытаниях пилотируемых КА работают обе системы, при этом воздушная система термостатирования для таких КА является низконапорной (от 50 до 100 мм вод.ст.).

Для беспилотных КА с панельной компоновкой применение низконапорных систем воздушного термостатирования при тепловых и электрических испытаниях значительно затрудняет организацию оперативного изменения локального отвода избыточного тепла от работающей аппаратуры. При этом использование высоконапорных систем воздушного термостатирования, когда термостатирование работающего оборудования осуществляется путем подачи в отсек КА дросселированного воздуха с давлением от (0.5 до $1.0 \cdot 10^5$ Па) и температурой выше температуры точки росы окружающей среды воздуха от сети высокого давления ($100 \cdot 10^5$ Па), является в настоящее время очень затратным, что связано с высокой начальной стоимостью промышленных компрессорных станций и высокими эксплуатационными затратами.

Поэтому для наземных электрических испытаний КА «Ангосат» панельной компоновки и пассивной децентрализованной системой обеспечения теплового режима (СОТР) на базе тепловых труб специалистами РКК «Энергия» была разработана система газодинамического термостатирования и выдано задание компании «Фригодизайн» на изготовление установки подготовки и подачи термостатирующего воздуха для этой схемы термостатирования, которые могут использоваться для термостатирования КА других типов с герметичными и с негерметичными приборными отсеками.

Система газодинамического наземного термостатирования включает установку подготовки и подачи термостатирующего воздуха, теплоизолированные воздухопроводы и устройство воздухораспределения.

Компоновка и рабочие характеристики установки воздушного термостатирования

Установка подготовки и подачи термостатирующего воздуха (рис. 1) выполнена в виде мобильного моноблока, смонтированного на раме, разделенного внутри на нижнюю зону холодильной установки с конденсатором и компрессором и верхнюю зону обработки воздуха с воздухоохладителем, нагревателем и высоконапорным вентилятором. Для снижения теплообмена с окружающей средой и шума при работе вентилятора на всех стенках зоны подготовки воздуха установлена теплозвукоизоляция. При работе холодильной установки температура на поверхности ее воздухоохладителя поддерживается системой управления на уровне, обеспечивающем его охлаждение и осушку термостатирующего воздуха до расчетных значений. Высоконапорный вентилятор при работе создает разрежение в верхней зоне установки, и воздух из окружающего пространства, проходя через

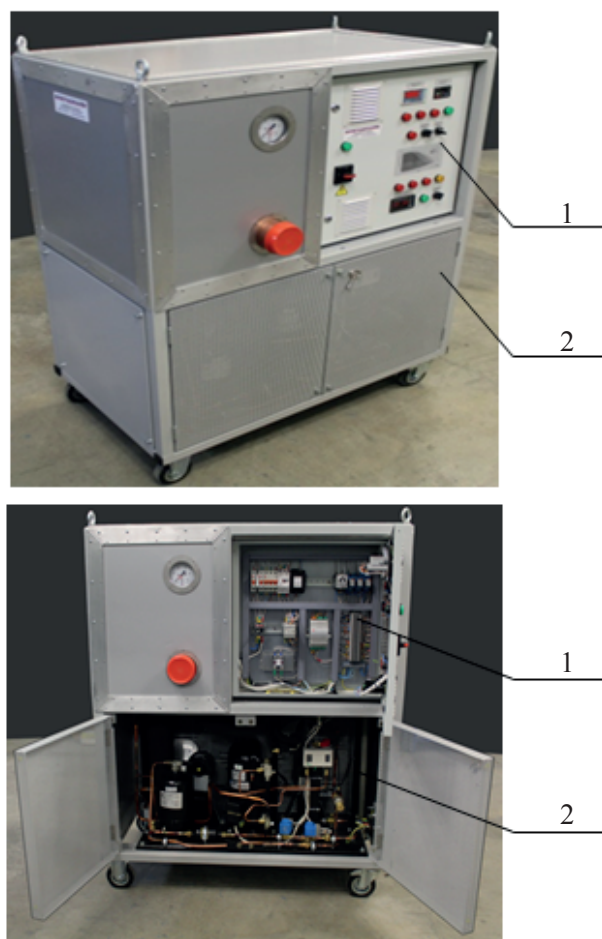


Рис. 1. Общий вид установки подготовки и подачи термостатирующего воздуха УВТ-FCA-5-TAG: 1 – зона обработки воздуха с воздухоохладителем, нагревателем и высоконапорным вентилятором; 2 – зона холодильной установки с конденсатором и компрессором

Таблица 1

Параметры воздуха на выходе из установки УВТ-FCA-5-TAG

Рабочие характеристики	Значения
Температура воздуха на выходе из установки, °С	+12 ÷ +25
Диапазон плавно регулируемого расхода, м ³ /ч;	100 ÷ 400
Диапазон регулируемого напора воздуха, мм вод.ст.	100 ÷ 600
Погрешность поддержания температуры, °С	не более 1 °С
Погрешность поддержания расхода воздуха, м ³ /ч	не более 6
Относительная влажность воздуха на выходе, %	не более 75

воздухоохладитель, охлаждается, осушается, при необходимости подогревается электрическим нагревателем, и попадает на вход вентилятора. Воздух на термостатирование забирается из зала испытаний, с учетом того, что испытания проводятся в зале с чистотой воздуха не ниже класса Р8 при температурах 20...25 °С была создана компактная и удобная в эксплуатации установка.

Воздух подогревается до заданной температуры внутри самого вентилятора за счет сжатия воздуха. В таких вентиляторах в зависимости от напора и расхода воздух может

нагреваться на $4 \div 15$ °С относительно его температуры на входе, это необходимо учитывать при расчете таких установок.

Установка подготовки и подачи термостатирующего воздуха позволяет выдавать в приборные отсеки термостатируемых изделий воздух с параметрами, указанными в табл. 1.

Следует отметить, что при использовании высоконапорных малорасходных установок для КА с панельной компоновкой приборно-агрегатного оборудования необходимо не только подать на оборудование поток воздуха с заданной температурой и расходом, но обеспечить равномерное или регулируемое поле скоростей в зоне термостатирования. Поэтому обязательным условием для таких установок является использование воздухо-распределительных устройств, связанных комплектом теплоизолированных воздуховодов с установкой подготовки и подачи воздуха.

Структура и состав устройства воздухораспределения

Специалистами РКК «Энергия» было разработано адаптируемое к геометрии объекта испытаний воздухораспределительное устройство для термостатирующего воздуха, представляющее собой пространственную конструкцию из жестких воздухораспределителей с встроенными в них соплами-форсунками. Равномерность подачи воздуха регулируется сменными дроссельными вставками внутри форсунок. Распыление воздуха производится через индивидуальные сопла – форсунки (рис. 2), закрепленные на определенном расстоянии друг от друга на жестком воздухораспределителе. Воздухораспределители объединяются с помощью коллектора в секции (рис. 3) воздухораспределительного устройства. Материалом распределителей и секций является полипропилен. Сопла и коллекторы связи с воздуховодами установки подачи воздуха выполнены из полиамида методом 3D печати. Использование неметаллов в конструкции средств газодинамического охлаждения позволило обеспечить испытания КА в безэховой камере.

Изменяя длину каждого воздухораспределителя, количество секций воздухораспределительного устройства, и проходные сечения сопел-форсунок можно изменить конфигурацию интенсивности охлаждения локальных зон приборных панелей КА. Совокупность секций воздухораспределителя образует воздухораспределительное устройство, разное для каждого КА. Например, для КА «Ангосат» потребовалось объединить шесть секций, для КА «Egyptsat-A» – три секции.

Упрощенная схема размещения сопел-форсунок секций воздухораспределителей для наземного газодинамического термостатирования КА «Ангосат» приведена на рис. 4.

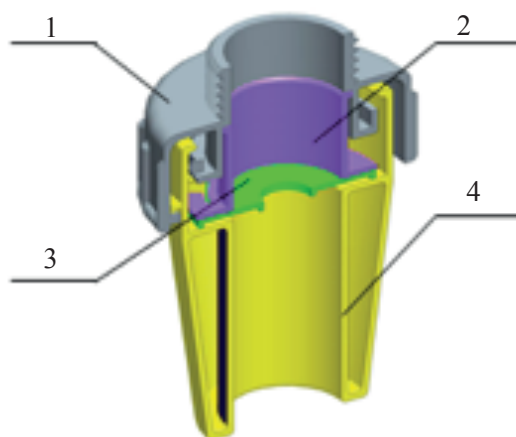


Рис. 2. Конструкция сопла-форсунки: 1 – крышка; 2 – втулка; 3 – сменный дроссель; 4 – сопло

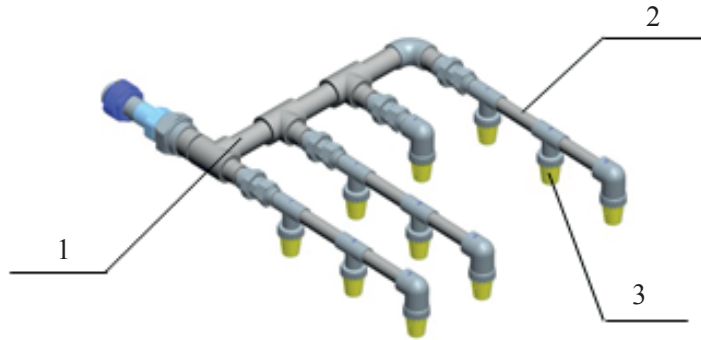


Рис. 3. Воздухораспределительная секция: 1 – коллектор; 2 – распределитель; 3 – сопло-форсунка

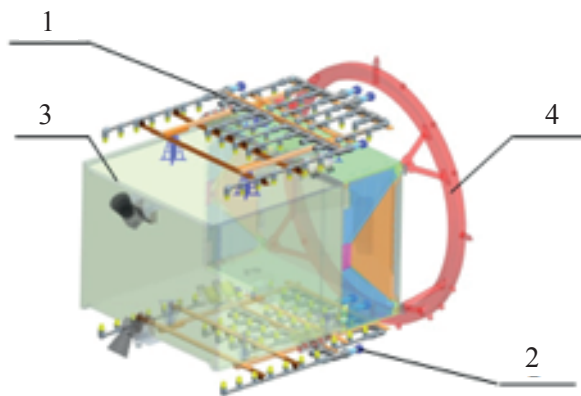


Рис. 4. Схема расположения сопел-форсунок установки газодинамического термостатирования КА «Ангосат»: 1, 2 – устройства воздухораспределения; 3 – КА «Ангосат»; 4 – опорное кольцо

Расчет параметров сопел-форсунок, расстояний между ними на распределителе, шаг распределителей в пределах секции производились по соотношениям для газодинамических расчетов [2]. Основные расчетные зависимости для выбора параметров воздухораспределителя и результаты расчетов приведены ниже

Коэффициент теплоотдачи для локальной зоны тепловыделения приборной панели определяется по формуле:

$$\alpha(\text{Re}) = Nu(\text{Re}) \cdot \frac{\lambda}{d} = \frac{Q}{F} \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{возд}}),$$

где $Nu(\text{Re}) = 0,285 \text{Re} \cdot 0,71 \text{Pr} \cdot 0,33 \left(\frac{H}{d} \right) - 0,123 \left(\frac{s}{d} \right) - 0,725$; Re – число Рейнольдса для локальной зоны; Pr – число Прандтля для воздуха; λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); d – внутренний диаметр сопла, м; H – расстояние от среза сопла до охлаждаемой поверхности, м; s – шаг сопел по распределителю, м; Q – тепловыделение в локальной зоне, Вт; F – площадь локальной зоны, м²; $t_{\text{п}}$ – допустимая температура локальной зоны панели, °С; $t_{\text{возд}}$ – температура термостатирующего воздуха, °С

Расход воздуха через сопло-форсунку можно определить

$$G_0 = 0,25 \text{Re} \cdot \mu \cdot \pi \cdot d,$$

где μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Охлаждающий воздух подается перпендикулярно на объект термостатирования, что позволяет более эффективно использовать расход воздуха по сравнению с традиционной параллельной подачей воздушного потока [3].

Экспериментальная отработка воздухораспределительного устройства

Перед практической реализацией воздухораспределителя были проведены испытания, подтверждающие эффективность принятых решений. В качестве имитатора приборной панели использовалась реальная трехслойная сотовая панель типового КА с тепловыми трубами. Тепловая нагрузка на панель имитировалась поверхностными нагревателями. При наземных испытаниях установленного на КА приборного оборудования термостатирующий воздух подается на приборные панели-радиаторы КА «Ангосат» перпендикулярно их поверхности [4]. Схема испытательного стенда приведена на рис. 5.

Проведены две серии, в каждой – по два эксперимента, в одном из них термостатирование включено, в другом – выключено. Первая серия – режим «рабочий обдув» – предполагает номинальную мощность тепловыделения электронагревателей на трехслойной

Таблица 2

Сравнение результатов автономных испытаний теплоотводящей панели с расчетными данными

Режим	Суммарная мощность тепловыделения, Вт	Расчетное значение температуры панели, °С	Температура панели при экспериментальной отработке, °С
Рабочий обдув	154	32.6	29.6
Интенсивный обдув	243	40.5	35.3

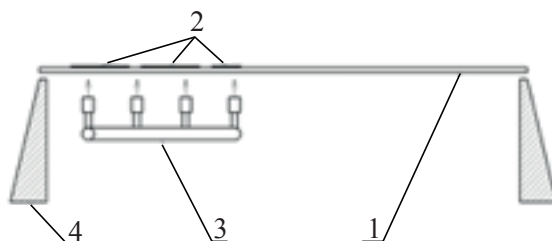


Рис. 5. Схема испытательного стенда: 1 – трехслойная сотовая панель с габаритами 2000×730×20 мм; 2 – имитаторы тепловой нагрузки; 3 – воздухораспределительная секция; 4 – технологическая подставка

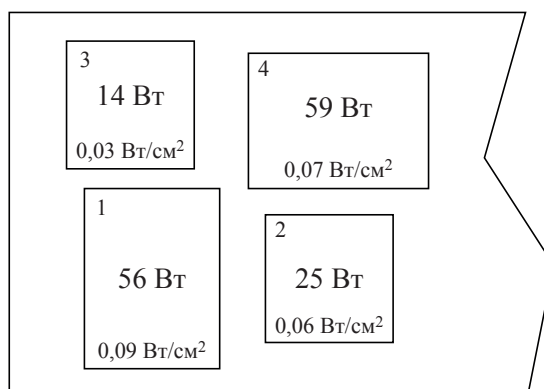


Рис. 6. Размещение имитаторов тепловой нагрузки (нагреваемых пластин) на трехслойной сотовой панели

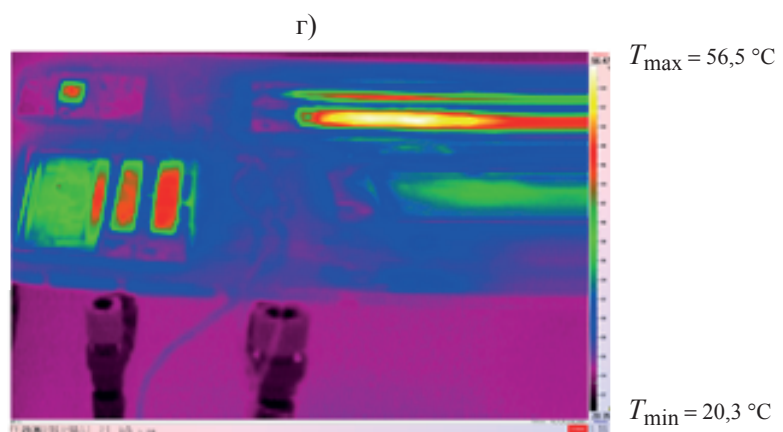
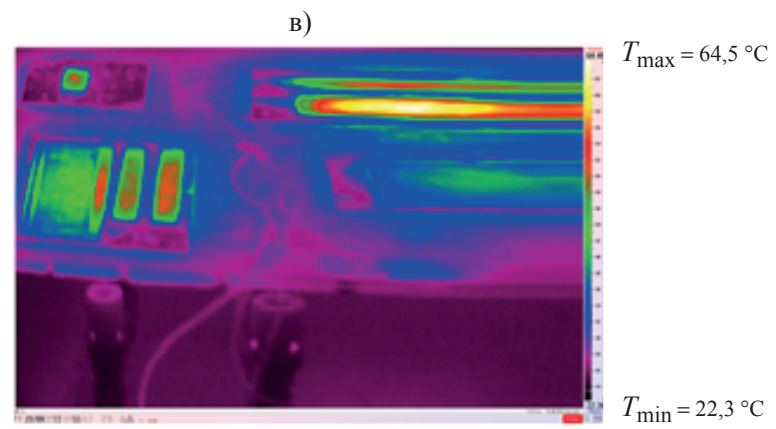
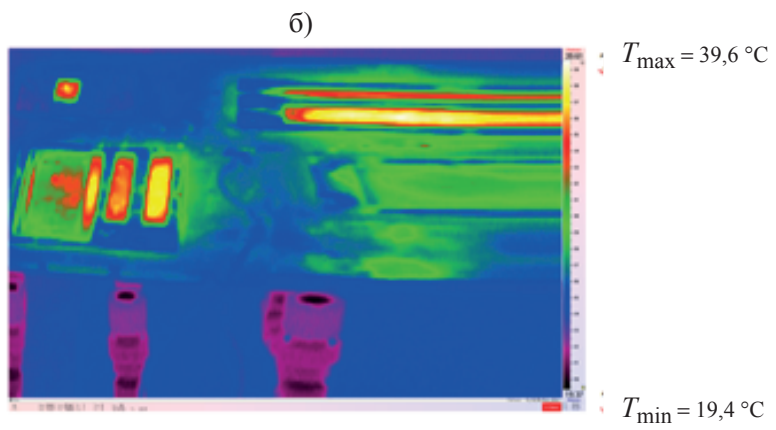
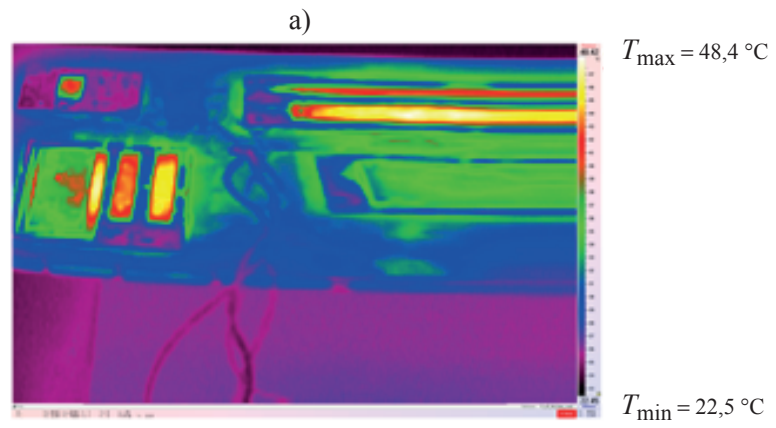


Рис. 7. Термограмма эксперимента № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в), № 4 (г)

сотовой панели. Вторая серия – режим «интенсивный обдув» – предполагает увеличенную мощность тепловыделения электронагревателей.

Состав проводимых экспериментов:

- эксперимент № 1 – серия «рабочий обдув», термостатирование выключено;
- эксперимент № 2 – серия «рабочий обдув», термостатирование включено;
- эксперимент № 3 – серия «интенсивный обдув», термостатирование выключено;
- эксперимент № 4 – серия «интенсивный обдув», термостатирование включено;

Результаты проведенных экспериментов с включенным термостатированием приведены в табл. 2.

Расчет значений температуры теплоотводящей панели проводился без учета теплоотдачи излучением с поверхности панели для температуры воздуха на выходе из сопла 18 °С, суммарного расхода воздуха, подаваемого на теплоотводящую панель 80 м³/ч, избыточного давления на выходе из установки подготовки и подачи воздуха не более 100 мм вод.ст. Значение скорости воздуха на срезе сопла при рабочем обдуве должно быть не менее 2.6 м/с. Расчет температуры проводился без учета теплоотдачи излучением с поверхности панели.

Результаты испытаний теплоотводящей панели, полученные с помощью тепловизора, приведены на рис. 7.

Испытания подтвердили эффективность предложенного использования системы газодинамического термостатирования для КА с размещением приборного оборудования вне герметичного отсека на теплоотводящих панелях.

Проведенные после определения основных параметров воздухораспределителя расчеты гидравлического тракта подачи термостатирующего воздуха показали достаточность для термостатирования значения напора воздуха на входе в воздухораспределители в 300...500 мм вод.ст.

По результатам работ определения способа газодинамического охлаждения и установки подготовки и подачи термостатирующего воздуха поданы заявки на изобретения:

– Басов А.А., Велюханов В.И., Коптелов К.А., Никонов А.В., Пациевский А.А. Способ воздушного термостатирования отсеков космических аппаратов и устройство для его осуществления, патент на изобретение № 2657603, дата регистрации 14 июня 2018 г.

– Басов А.А., Быстров А.В., Никонов А.В., Пациевский А.А. Средство распределения и подачи термостатирующего воздуха на поверхность панельного космического аппарата при наземных испытаниях, заявка на изобретение № 2017124753 от 11.07.2017 г. (в стадии патентования).

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных расчетных и экспериментальных работ подтверждена эффективность разработанной специалистами РКК «Энергия» системы газодинамического наземного охлаждения КА с компоновкой тепловыделяющего оборудования на теплоотводящих панелях. Система обеспечила гарантированный теплоотвод от бортовой аппаратуры КА «Ангосат» при наземных электрических испытаниях.

2. Разработанная компанией Фригодизайн установка подготовки и подачи воздуха для системы газодинамического термостатирования обеспечивает с высокой точностью параметры воздуха, подаваемого в воздухораспределительные секции. Установка отличается малым энергопотреблением и низким уровнем шума при эксплуатации.

3. Использование новых адаптируемых к геометрии и распределению тепловых мощностей объекта испытаний многосекционных воздухораспределительных устройств с регулируемыми соплами-форсунками позволят создавать установки газодинамического термостатирования, обеспечивающие гарантированный теплоотвод от бортовой аппаратуры КА разной конфигурации при различных уровнях ее тепловыделения в наземных проверочных испытаниях.

Авторы выражают благодарность Д.А. Замышляеву, Л.В. Быкову, Д.С. Янышеву за помощь в моделировании процессов теплообмена и конструкции испытательной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент RU2286291. *Шелудько В.Г., Томчук А.В., Голованов Ю.М., Кесельман Г.Д.* Система обеспечения теплового режима,
2. *Мартыненко О.Г., Михалевич А.А., Шикоз В.К.* Справочник по теплообменникам Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.
3. *Zuckerman N., Lior N.* Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, and Numerical Modeling // *Advances in Heat Transfer*. 2006. V. 39. С. 565–631. ISSN 0065-2717.
4. *Пацевский А.А.* Разработка и внедрение установки для обеспечения теплового режима космических аппаратов при наземной отработке способом газодинамического термостатирования // Тезисы докл. XXI Научно-техн. конф. молодых ученых и специалистов. Т. 1. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, 2017. С. 220–221.

УДК 62-712.8

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ. МЕТОДИКА РАСЧЁТА
ТЕПЛОВЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**© 2018 г. А.А. БАСОВ¹, М.А. ЛЕКСИН^{1*}, Ю.М. ПРОХОРОВ¹, А.С. МЯКОЧИН²

¹Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация
«Энергия» им. С.П. Королёва», Королёв, Московская обл.

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва

E-mail: LexinMA@mail.ru

В работе приведены конструкция и методика расчёта тепловых и гидравлических характеристик устройства для воздушного охлаждения тепловыделяющей аппаратуры, расположенной снаружи дозвуковых летательных аппаратов. В качестве охлаждающей среды используется набегающий поток атмосферного воздуха, проходящий за счёт скоростного напора через проточные полости воздушных термоплат, на поверхности которых установлено с обеспечением гарантированного теплового контакта тепловыделяющее оборудование. Методика расчёта позволяет определить диапазоны высот и скоростей полёта летательного аппарата при заданной тепловой нагрузке оборудования и температуре набегающего потока воздуха, которые обеспечивают поддержание температуры оборудования не выше заданного уровня. Методика обосновывает необходимость разбивать воздушный тракт устройства на независимые участки для обеспечения равномерного распределения потока воздуха через проточные полости воздушных термоплат.

Ключевые слова: летательный аппарат, тепловыделяющее оборудование, воздушное охлаждение, методика расчёта, тепловые и гидравлические характеристики.

**APPLIANCE FOR AIR COOLING OF HEAT-GENERATING EQUIPMENT.
METHOD OF CALCULATING OF HEAT AND HYDRAULIC CHARACTERISTICS**A.A. BASOV¹, M.A. LEKSIN¹, Y.M. PROHOROV¹, A.S. MIKOCHEIN²

¹S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Moscow Region, Russia

² Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

E-mail: LexinMA@mail.ru

The current paper contains construction and method of calculating of heat and hydraulic characteristics of appliance for air cooling of heat-generating equipment, mounted outside aircraft. Oncoming air flow is used as cooling medium. It passes through flow cavity of air thermolplates on surface of which heat-generating equipment is mounted with provision of guaranteed thermal contact. Method of calculating allows determining the ranges of high and speed of aircraft flight for given heat load and temperature of oncoming air flow, at

which temperature of equipment is maintained no higher than the preset level. Also method allows to justify the need to split air path of appliance on independent parts to ensure uniform distribution of air flow through flow cavity of air thermolplates.

Keywords: aircraft, heat-generating equipment, air cooling, calculating method, heat and hydraulic characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение количества аппаратуры различного вида и назначения на борту летательного аппарата (ЛА) приводит к росту тепловыделения и необходимости охлаждения для обеспечения необходимого температурного режима и нормальных условий работы системы.

Часть аппаратуры из-за особенностей работы размещается снаружи ЛА на специальных подвесах, в подвесных контейнерах и подобных устройствах.

Обзор существующих подходов к охлаждению бортовой аппаратуры подвесных авиационных контейнеров представлен в работе [1]. В большинстве систем для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры используется контур с жидким теплоносителем [2]. При использовании систем воздушного охлаждения забор воздуха производится из компрессора двигателя ЛА. В связи с высокой температурой поступающего воздуха необходимо его предварительно охлаждать в теплообменниках.

Цель разработки конструкции устройства воздушного охлаждения тепловыделяющей аппаратуры ЛА с использованием потока набегающего воздуха для полётов на относительно небольших скоростях (100–180 км/ч) и высотах полёта (до 3300 м) – упрощение конструкции системы охлаждения бортовой аппаратуры, увеличение её надёжности и снижение массогабаритных характеристик.

Предлагаемая в данной работе конструкция устройства предусматривает использование скоростного напора заборного атмосферного воздуха для прокачки его через воздушные термоплаты, которые находятся в термическом контакте с тепловыделяющими поверхностями оборудования.

КОНСТРУКЦИЯ УСТРОЙСТВА

Принципиальная схема устройства воздушного охлаждения тепловыделяющей аппаратуры приведена на рис. 1. Оно выполнено в виде единого блока и состоит из воздухозаборника 6, крепежной рамы 1, на которой установлены теплообменники (воздушные термоплаты) 2 для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры 3.

Крепежная рама (рис. 2) представляет собой объемную конструкцию из силовых профилей 9 и образует по длине ярусы 10, скрепленные горизонтальными стойками 11. Каждый ярус состоит из четырех силовых профилей, установленных по принципу колодезной кладки с консолями 12 для установки воздушных термоплат.

Все свободные площади со стороны внутренней части колодезной кладки, кроме проходных сечений воздушных термоплат, закрыты тонкостенными перегородками так, что центральная часть колодезной кладки силовых профилей является коллектором 7 для распределения потоков воздуха между воздушными термоплатами.

Для обеспечения равномерного расхода через воздушные термоплаты в коллекторе предусмотрены перегородки 8, разделяющие его на независимые участки. Воздух к участкам, расположенным за первым по направлению движения летательного аппарата, поступает по отдельным воздуховодам 4, установленным в угловых зонах крепежной рамы, и диффузорам 5. Схема движения воздуха на независимом участке устройства показана на рис. 3.

Теплообменники для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры выполнены в виде воздушных термоплат, установленных под углом 45° по ходу движения воздушного

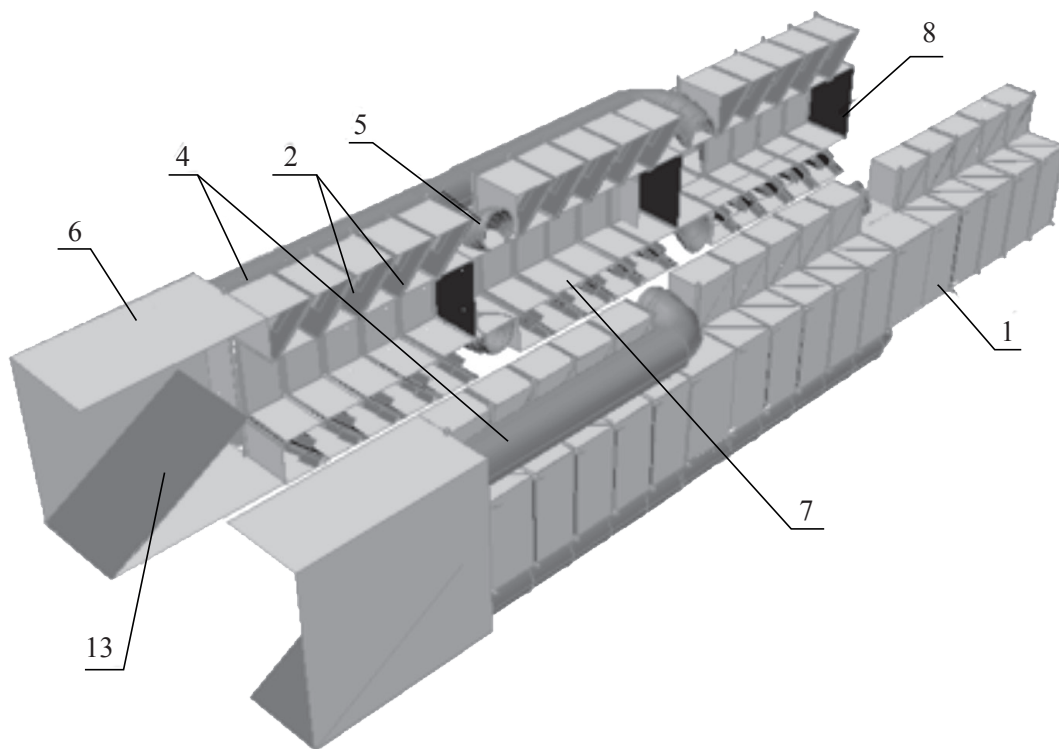


Рис. 1. Принципиальная схема устройства воздушного охлаждения тепловыделяющей аппаратуры, расположенной снаружи летательных аппаратов

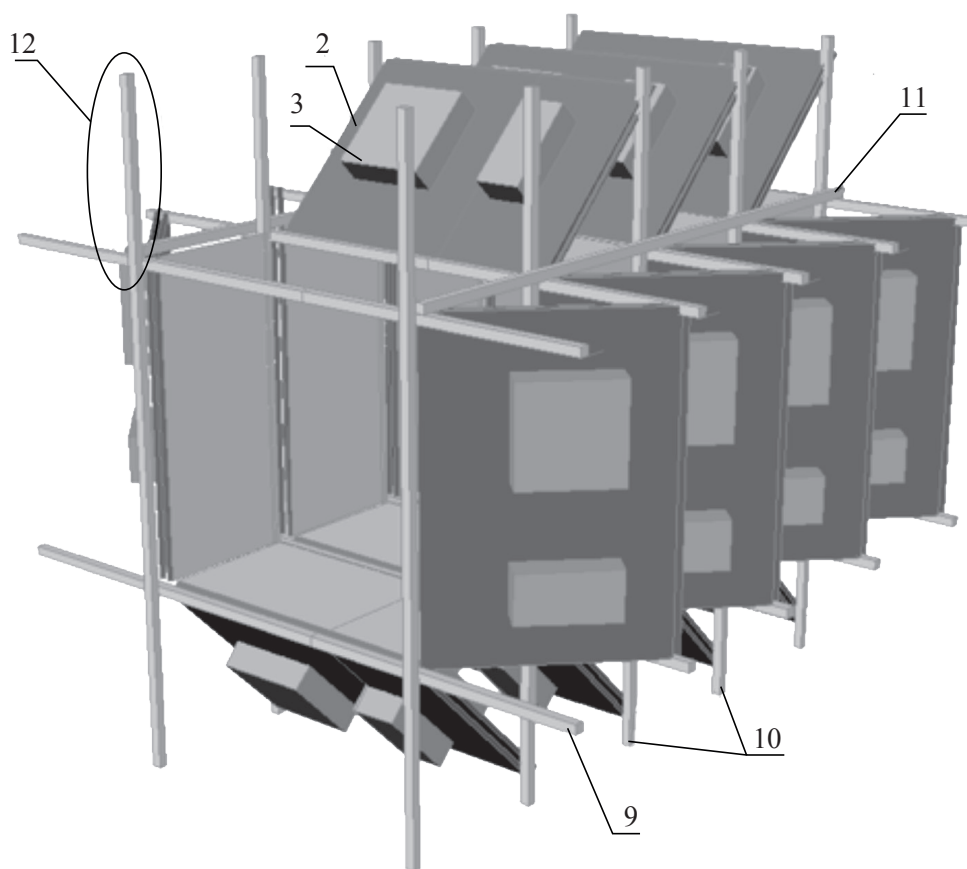


Рис. 2. Крепежная рама с установленными теплообменниками (воздушными термоплатами) с тепловыделяющей аппаратурой

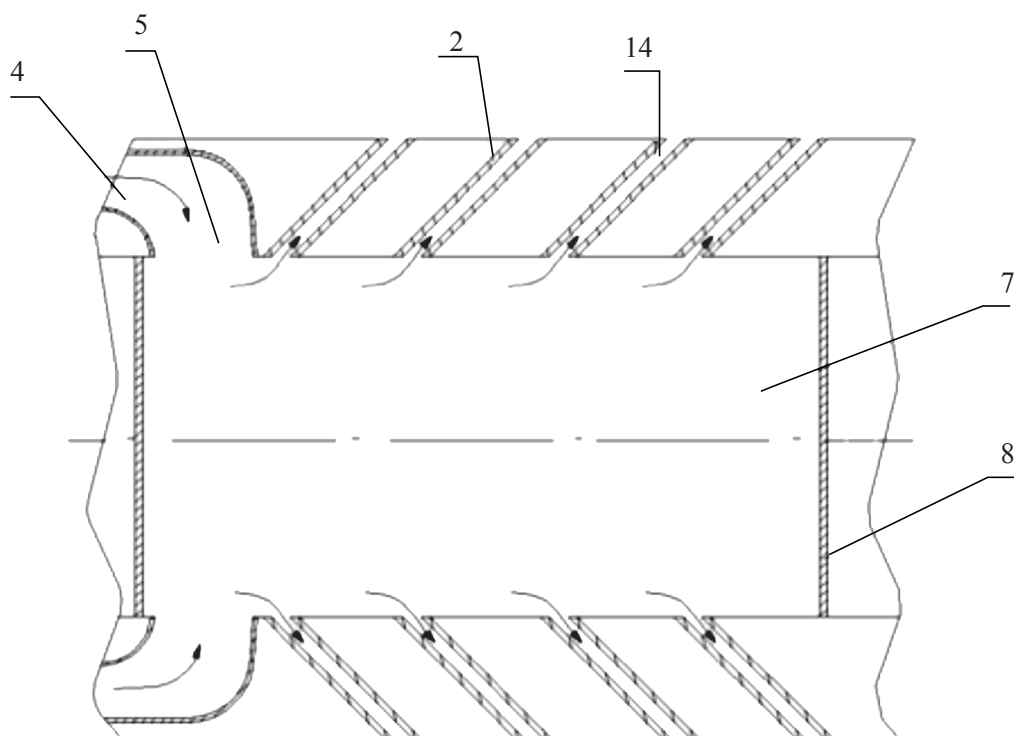


Рис. 3. Схема движения воздуха на независимом участке устройства

потока, что обусловлено снижением гидравлического сопротивления системы с учётом существующих габаритов и компоновки тепловыделяющей аппаратуры. Расстояние между теплоплатами определяется, исходя из компоновочных соображений, удобства установки аппаратуры, размещения ее элементов и кабельной сети.

Боковые поверхности теплообменников, кроме входных и выходных сечений воздушных теплоплат, закрыты тонкостенными перегородками.

Воздушная теплоплата состоит из двух крышек, двух рамок, промежуточной пластины и гофрированных вкладышей, соединенных в единую сборку методом диффузионной пайки в вакууме. Проточная полость (14) воздушной теплоплат включает входной участок, участок с гофрированными вкладышами и выходной участок. Тепловыделяющая аппаратура на каждой теплоплате устанавливается с двух сторон.

Температура поверхностей тепловыделяющей аппаратуры контролируется температурными датчиками, установленными на поверхностях тепловыделяющей аппаратуры.

Во избежание попадания в воздухозаборник б грязи и посторонних предметов при нахождении ЛА на земле и во время спуска и набора высоты предусмотрена заслонка 13, перекрывающая доступ воздуха в коллектор системы воздушного охлаждения.

Принцип работы устройства воздушного охлаждения заключается в следующем. При наборе высоты, при котором исключается возможность попадания в воздушный коллектор грязи и посторонних предметов, открывается заслонка, установленная в воздухозаборнике. Скоростной воздушный поток атмосферного воздуха, возникающий при движении ЛА, проходит через воздухозаборник, попадает в воздуховоды и коллектор, из которого распределяется через проточные полости воздушных теплоплат. Проходя проточные полости воздушных теплоплат, воздух охлаждает их термостатируемые поверхности и тепловыделяющую аппаратуру, которая на них установлена. Воздушный поток направляется последовательно от первого участка по движению ЛА к последующим участкам. На спуске при достижении высоты, при которой появляется возможность попадания в воздушный коллектор грязи и посторонних предметов, заслонка в воздухозаборнике закрывается, перекрывая поступление набегающего воздушного потока.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА

Расчётная схема независимого участка устройства воздушного охлаждения с указанием расчётных сечений приведена на рис. 4.

На первом этапе расчёта определяется гидравлическое сопротивление проточной полости одной воздушной термоплаты в зависимости от скорости движения воздуха на входе в термоплату, скорости полёта ЛА, температуры и давления окружающей среды. Оно складывается из трёх составляющих: сопротивление входного и выходного участков и сопротивление участка воздушной термоплаты, на котором установлен гофрированный вкладыш:

$$\Delta P_{\Sigma}(w, w_{\text{пол}}, t, P) = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\Gamma} + \Delta P_{\text{вых}}.$$

Гидравлическое сопротивление входного участка воздушной термоплаты в зависимости от скорости воздуха на входе в воздушную термоплату, температуры и давления воздуха:

$$\Delta P_{\text{вх}}(w, t, P) = \lambda_{\text{тр.пр}}(\text{Re}_{\text{вх}}(w, t, P), b_{\text{вх}}, h_{\text{вх}}) \frac{L_{\text{вх}}}{d_{\text{ЭКВ}}^{\text{вх}}} \cdot \frac{\rho_{\text{возд}}(t, P) w^2}{2},$$

где $b_{\text{вх}}$ – ширина входного участка воздушной термоплаты; $h_{\text{вх}}$ – высота входного участка; $L_{\text{вх}}$ – длина входного участка; $\lambda_{\text{тр.пр}}(\text{Re}, b, h)$ – коэффициент гидравлического сопротивления каналов прямоугольного сечения; $\text{Re}_{\text{вх}}(w, t, P) = \frac{d_{\text{ЭКВ}}^{\text{вх}} \cdot w}{\nu_{\text{возд}}(t, P)}$ – число Рейнольдса для течения воздуха на входном участке.

Скорость воздуха на участке воздушной термоплаты с гофром в зависимости от скорости воздуха на входе в термоплату определяется из соотношения площадей проходного сечения входного участка и участка с гофром:

$$w_{\Gamma}(w) = w \cdot \frac{F_{\text{пр}}^{\text{вх}}}{F_{\text{пр}}^{\Gamma}}.$$

Гидравлическое сопротивление участка воздушной термоплаты с гофром в зависимости от скорости воздуха на входе, температуры и давления воздуха:

$$\Delta P_{\Gamma}(w, t, P) = \left(\lambda_{\text{тр.пр}}(\text{Re}_{\Gamma}(w, t, P), b_{\Gamma}, h_{\Gamma}) \frac{L_{\Gamma}}{d_{\text{ЭКВ}}^{\Gamma}} + \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}} \right) \cdot \frac{\rho_{\text{возд}}(t, P) \cdot w_{\Gamma}(w)^2}{2},$$

где b_{Γ} – ширина одного канала гофра воздушной термоплаты; h_{Γ} – его высота; L_{Γ} – длина; $\zeta_{\text{вх}} = 1,0$; $\zeta_{\text{вых}} = 0,5$ – коэффициенты гидравлического сопротивления на входе и выходе

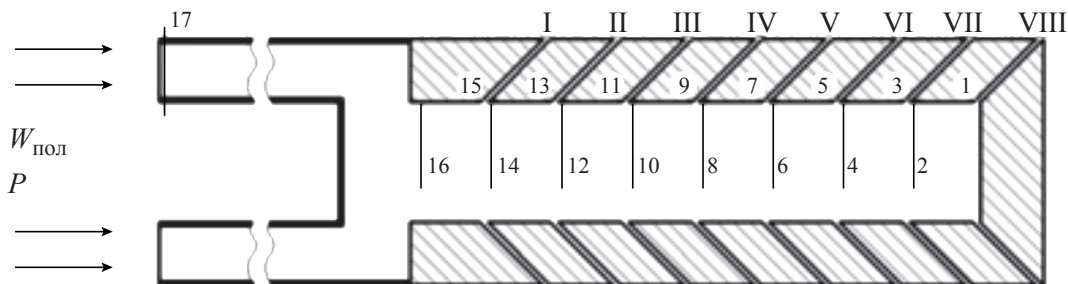


Рис. 4. Расчётная схема независимого участка устройства

из каналов гофра; $Re_{\Gamma}(w, t, P) = \frac{d_{\text{ВЫХ}}^{\Gamma} \cdot w_{\Gamma}(w)}{v_{\text{ВОЗД}}(t, P)}$ – число Рейнольдса для течения воздуха на участке воздушной термоплаты с гофром.

Гидравлическое сопротивление выходного участка воздушной термоплаты в зависимости от скорости воздуха на входе в воздушную термоплату, температуры и давления воздуха и скорости полёта:

$$\Delta P_{\text{ВЫХ}}(w, w_{\text{ПОЛ}}, t, P) = \left(\lambda_{\text{ТР.ПР}}(Re_{\text{ВЫХ}}(w, t, P), b_{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ВЫХ}}) \cdot \frac{L_{\text{ВЫХ}}}{d_{\text{ЭКВ}}^{\text{ВЫХ}}} + \zeta_{\text{ВЫХ.}w}(w, w_{\text{ПОЛ}}) \right) \times \frac{\rho_{\text{ВОЗД}}(t, P) \cdot w^2}{2},$$

где $b_{\text{ВЫХ}}$ – ширина выходного участка воздушной термоплаты; $h_{\text{ВЫХ}}$ – его высота; $L_{\text{ВЫХ}}$ – длина; $Re_{\text{ВЫХ}}(w, t, P) = \frac{d_{\text{ЭКВ}}^{\text{ВЫХ}} \cdot w}{v_{\text{ВОЗД}}(t, P)}$ – число Рейнольдса для течения воздуха на выходном участке; $\zeta_{\text{ВЫХ.}w}(w, w_{\text{ПОЛ}})$ – коэффициент гидравлического сопротивления при выходе из проточной части термоплаты в движущийся поток воздуха.

На втором этапе расчёта определяется распределение скоростей на входе в термоплаты. Скорость на входе в последнюю по ходу воздуха термоплату (в сечении 1 на рис. 4) обозначим w . Тогда давление воздуха в сечении 1:

$$P_1(w, w_{\text{ПОЛ}}, t, h, P_0) = P(t, h, P_0) + \Delta P_{\Sigma}(w, w_{\text{ПОЛ}}, t, P(t, h, P_0)),$$

где $P(t, h, P_0)$ – атмосферное давление воздуха при температуре t на высоте h при давлении на уровне моря P_0 ; $\Delta P_{\Sigma}(w, w_{\text{ПОЛ}}, t, P(t, h, P_0))$ – гидравлическое сопротивление проточной полости воздушной термоплаты при прохождении через неё воздуха со скоростью на входе w с температурой t и давлением $P(t, h, P_0)$ при скорости полёта $w_{\text{ПОЛ}}$.

Скорость в коллекторе в сечении 2:

$$w_2(w) = 4 \cdot w \cdot \frac{F_{\text{ПР}}^{\text{ВХ}}}{F_{\text{ПР}}^{\text{К}}}$$

Число Рейнольдса для течения в коллекторе в сечении 2:

$$Re_2(w, t, P) = \frac{d_{\text{ЭКВ}}^{\text{К}} \cdot w_2(w)}{v_{\text{ВОЗД}}(t, P)}.$$

Для определения давления воздуха в коллекторе в сечении 2 примем допущение, что раздача через дальние от входа в коллектор воздушные термоплаты аналогична потерям на боковое сопротивление раздающего тройника. Таким образом, с учётом потерь давления между сечениями 1 и 2:

$$P_2(w, w_{\text{ПОЛ}}, t, h, P_0) = P_1(w, w_{\text{ПОЛ}}, t, h, P_0) + \left[\lambda_{\text{ТР.ПР}}(Re_2(w, t, P(t, h, P_0)), d_{\text{ЭКВ}}^{\text{К}}, d_{\text{ЭКВ}}^{\text{К}}) \frac{L}{d_{\text{ЭКВ}}^{\text{К}}} + \left(1 + 0,3 \left(\frac{w}{w_2(w)} \right)^2 \right) \right] \frac{\rho_{\text{ВОЗД}}(t, P(t, h, P_0)) w_2(w)^2}{2}.$$

Пусть скорость воздуха в сечении 3 равна w_6 .

Давление воздуха в сечении 3:

$$P_3(w_6, w_{\text{пол}}, t, h, P_0) = P(t, h, P_0) + \Delta P_{\Sigma}(w_6, w_{\text{пол}}, t, P(t, h, P_0)).$$

Скорость в коллекторе в сечении 4:

$$w_4(w, w_6) = w_2(w) + 4w_6 \frac{F_{\text{пр}}^{\text{ВХ}}}{F_{\text{пр}}^{\text{К}}}.$$

Для определения давления воздуха в сечении 4 примем допущение, что раздача через термоплаты аналогична потерям на боковое сопротивление тройника.

С одной стороны давление в сечении 4 определяется следующим образом:

$$P_4(w_6, w_{\text{пол}}, t, h, P_0) = P_3(w_6, w_{\text{пол}}, t, h, P_0) + \left[\zeta_6 \left(\frac{F_{\text{пр}}^{\text{ВХ}}}{F_{\text{пр}}^{\text{К}}}, \frac{w_6}{w_4(w, w_6)} \frac{F_{\text{пр}}^{\text{ВХ}}}{F_{\text{пр}}^{\text{К}}} \right) + \lambda_{\text{тр.пр}} \left(\text{Re}_4(w, w_6, t, P(t, h, P_0)), d_{\text{ЭКВ}}^{\text{К}}, d_{\text{ЭКВ}}^{\text{К}} \right) \frac{L}{d_{\text{ЭКВ}}^{\text{К}}} \right] \times \frac{\rho_{\text{возд}}(t, P(t, h, P_0)) \cdot w_4(w, w_6)^2}{2}, \quad (1)$$

где $\zeta_6 \left(\frac{F_6}{F_{\text{пр}}}, \frac{Q_6}{Q_{\text{пр}}} \right)$ – коэффициент гидравлического сопротивления бокового ответвления тройника.

Но давление в сечении 4 определяется как:

$$P_4(w_6, w_{\text{пол}}, t, h, P_0) = P_2(w_6, w_{\text{пол}}, t, h, P_0) + \left[\zeta_{\text{п}} \left(\frac{F_{\text{пр}}^{\text{ВХ}}}{F_{\text{пр}}^{\text{К}}}, \frac{w_6}{w_{18}(w, w_6)} \frac{F_{\text{пр}}^{\text{ВХ}}}{F_{\text{пр}}^{\text{К}}} \right) + \lambda_{\text{тр.пр}} \left(\text{Re}_{18}(w, w_6, t, P(t, h, P_0)), d_{\text{ЭКВ}}^{\text{К}}, d_{\text{ЭКВ}}^{\text{К}} \right) \frac{L}{d_{\text{ЭКВ}}^{\text{К}}} \right] \times \frac{\rho_{\text{возд}}(t, P(t, h, P_0)) \cdot w_4(w, w_6)^2}{2}, \quad (2)$$

где $\zeta_{\text{п}} \left(\frac{F_6}{F_{\text{пр}}}, \frac{Q_6}{Q_{\text{пр}}} \right)$ – коэффициент гидравлического сопротивления тройника на проход.

Приравнивая правые части уравнений (1) и (2), получаем уравнение для определения w_6 .

Аналогично расчёту давления воздуха в сечениях 3 и 4 проводится расчёт для остальных сечений $i = (5, 7, 9, 11, 13, 15)$ и $j = (6, 8, 10, 12, 14, 16)$.

Гидравлическое сопротивление на участке между сечениями 16 и 17 складывается из потерь на трение в воздуховодах, на поворот в диффузорах и потерь на соединение двух потоков:

– гидравлические потери на трение:

$$\Delta P_{16-17}^{\text{тр}}(w, t, h, P_0) = \lambda_{\text{тр}} \left(\text{Re}_{16-17}(w, t, P(t, h, P_0)) \right) \cdot \frac{l_{\text{в}}}{D_{\text{в}}} \cdot \frac{\rho_{\text{возд}}(t, P(t, h, P_0)) \cdot w_{17}(w)^2}{2},$$

где $l_{\text{в}}$ – длина воздуховода;

– гидравлические потери на поворот:

$$\Delta P_{16-17}^{\text{пов}}(w, t, h, P_0) = \left[0,95 \cdot \sin^2\left(\frac{90^\circ}{2}\right) + 2,05 \cdot \sin^4\left(\frac{90^\circ}{2}\right) \right] \cdot \left(0,95 + \frac{33,5}{90} \right) \times \\ \times \frac{\rho_{\text{возд}}(t, P(t, h, P_0)) \cdot w_{17}(w)^2}{2};$$

– гидравлические потери на слияние потоков:

$$\Delta P_{16-17}^{\text{сл}}(w, t, h, P_0) = \zeta_{\text{сл}} \left(\frac{F_{\text{пр}}^{\text{Б}}}{F_{\text{пр}}^{\text{К}}}, \frac{w_{17}(w) \cdot F_{\text{пр}}^{\text{Б}}}{w_{16}(w) \cdot F_{\text{пр}}^{\text{К}}} \right) \cdot \frac{\rho_{\text{возд}}(t, P(t, h, P_0)) \cdot w_{16}(w)^2}{2},$$

где $\zeta_{\text{сл}} \left(\frac{F_6}{F_{\text{пр}}}, \frac{Q_6}{Q_{\text{пр}}} \right)$ – коэффициент гидравлического сопротивления тройника на слияние потоков.

Таким образом, давление воздуха в сечении 17 (на входе в воздухопроводы) определяется как:

$$P_{17}(w, w_{\text{пол}}, t, h, P_0) = P_{16}(w, w_{\text{пол}}, t, h, P_0) + \Delta P_{16-17}^{\text{тр}}(w, t, h, P_0) + \Delta P_{16-17}^{\text{пов}}(w, t, h, P_0) + \\ + \Delta P_{16-17}^{\text{сл}}(w, t, h, P_0).$$

Запишем уравнение Бернулли для торможения набегающего потока при входе в воздухопровод:

$$P(t, h, P_0) + \frac{\rho_{\text{возд}}(t, P(t, h, P_0)) w_{\text{пол}}^2}{2} = \\ = P_{17}(w, w_{\text{пол}}, t, h, P_0) + \frac{\rho_{\text{возд}}(t, P(t, h, P_0)) \cdot w_{17}(w)^2}{2}.$$

Решение этого уравнения для зафиксированной скорости и высоты полёта, температуры окружающей среды и давления воздуха на уровне моря позволяет определить скорость в сечении 1 и распределение скоростей воздуха через проточные полости воздушных термоплат.

На третьем этапе расчёта по найденным скоростям через проточные полости воздушных термоплат для определённого тепловыделения аппаратуры определяется температура поверхности термоплаты, на которой установлено тепловыделяющее оборудование.

Коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха для канала с гофром в зависимости от скорости воздуха на входе в воздушную термоплату, температуры и давления воздуха:

$$\alpha_{\Gamma}(w, t, P) = \frac{\text{Nu}_{\Gamma}(w, t, P) \lambda_{\text{возд}}(t)}{d_{\text{ЭКВ}}^{\Gamma}},$$

где $\text{Nu}_{\Gamma}(w, t, P)$ – число Нуссельта для канала с гофром в зависимости от скорости воздуха на входе в термоплату, температуры и давления воздуха, рассчитываемое по зависимости [3].

Коэффициент эффективности ребра в зависимости от скорости воздуха на входе в воздушную термоплату, температуры и давления воздуха:

$$\eta(w, t, P) = \frac{th \left((h_{\Gamma} - \delta_{\Gamma}) \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{\Gamma}(w, t, P)}{\delta_{\Gamma} \cdot \lambda_{\text{ал}}}} \right)}{(h_{\Gamma} - \delta_{\Gamma}) \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{\Gamma}(w, t, P)}{\delta_{\Gamma} \cdot \lambda_{\text{ал}}}}}.$$

Теплосъем на градус логарифмического перепада температуры в зависимости от скорости воздуха на входе в термоплату, температуры и давления воздуха:

$$kF(w, t, P) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\Gamma}(w, t, P) \cdot \eta(w, t, P) \cdot F_{\text{охл}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ал}} \cdot 2 \cdot (2 \cdot B_{\Gamma}) \cdot (2 \cdot L_{\Gamma})}}.$$

Тепловая нагрузка, приходящаяся на одну воздушную термоплату:

$$Q_{\text{ТП}} = \frac{Q}{N_{\text{ТП}}}.$$

Логарифмический перепад температуры в зависимости от скорости воздуха на входе в воздушную термоплату, температуры и давления воздуха:

$$\Delta t_{\text{л}}(w, t, P) = \frac{Q_{\text{ТП}}}{kF(w, t, P)},$$

Температура воздуха на выходе из участка с гофром в зависимости от скорости воздуха на входе в воздушную термоплату, температуры и давления воздуха:

$$t_{\text{вых}}(w, t, P) = t + \frac{Q_{\text{ТП}}}{W(w, t, P)},$$

где $W(w, t, P) = w_{\Gamma}(w) \cdot F_{\text{пр}}^{\Gamma} \cdot C_{p_{\text{возд}}} \cdot \rho_{\text{возд}}(t, P)$

Температура поверхности термоплаты на участке, где установлены гофрированные вкладыши (участок с установленной тепловыделяющей аппаратурой), в зависимости от скорости воздуха на входе в термоплату, температуры и давления воздуха имеет вид:

$$t_{\text{ст}}(w, t, P) = \frac{\exp\left(\frac{t_{\text{вых}}(w, t, P) - t}{\Delta t_{\text{л}}(w, t, P)}\right) t_{\text{вых}}(w, t, P) - t}{\exp\left(\frac{t_{\text{вых}}(w, t, P) - t}{\Delta t_{\text{л}}(w, t, P)}\right) - 1}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

По предложенной методике проведён расчёт устройства воздушного охлаждения определённой конфигурации. Суммарное тепловыделение оборудования на независимом участке составляло 13 кВт. Максимально допустимая температура поверхности оборудования была принята по технической документации 60 °С. Количество термоплат на одном участке принималось равным 24 шт.

На рисунках 5–7 приведены расчётные зависимости температуры поверхности оборудования от скорости на входе в воздушную термоплату, высоты полёта и температуры окружающего воздуха.

Распределение скоростей на входе в воздушные термоплату в зависимости от высоты и скорости полёта ЛА, температуры окружающего воздуха приведено в таблицах 1 и 2.

Можно сделать вывод, что выбранная конструкция обеспечивает допустимую температуру поверхности оборудования при заданном уровне тепловыделения.

Из рис. 5 видно, что дальнейшее повышение температуры окружающего воздуха приведёт к росту температуры поверхности оборудования выше допустимого уровня.

Увеличение количества воздушных термоплат ведёт к неравномерности распределения скоростей на их входе. При достаточно длинном коллекторе скорость на входе

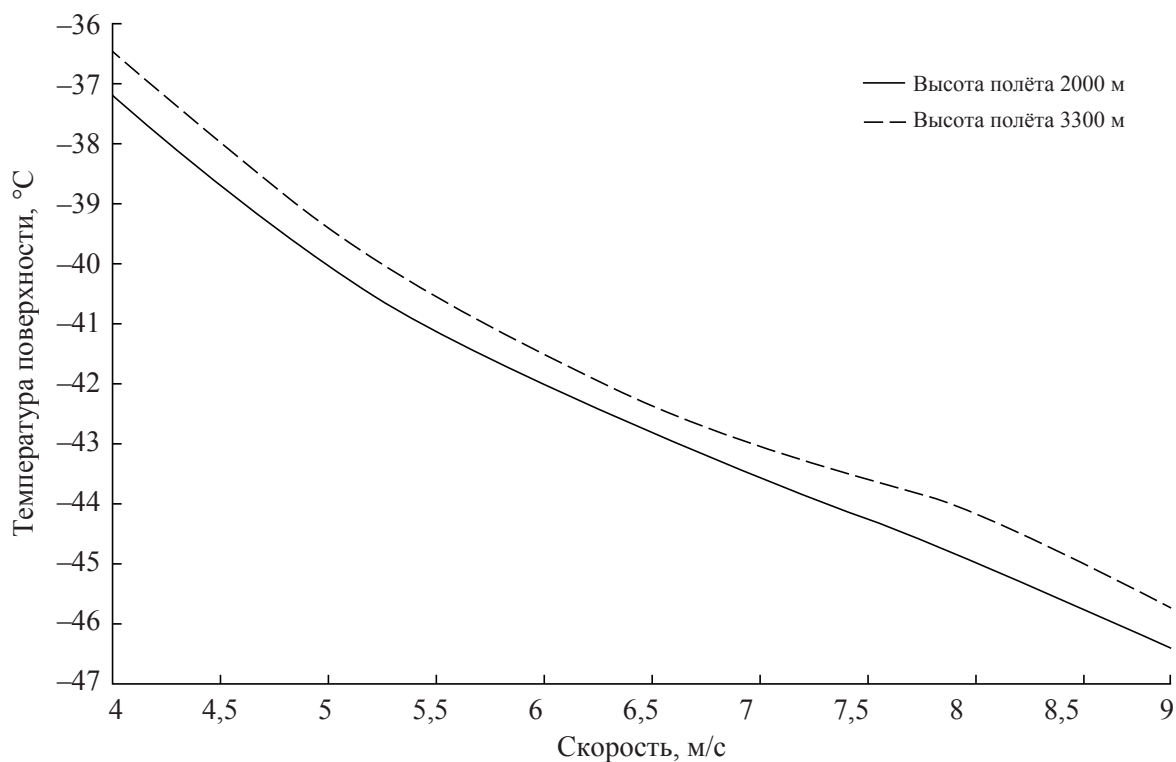


Рис. 5. Температура поверхности оборудования при высоте полёта 2000 м

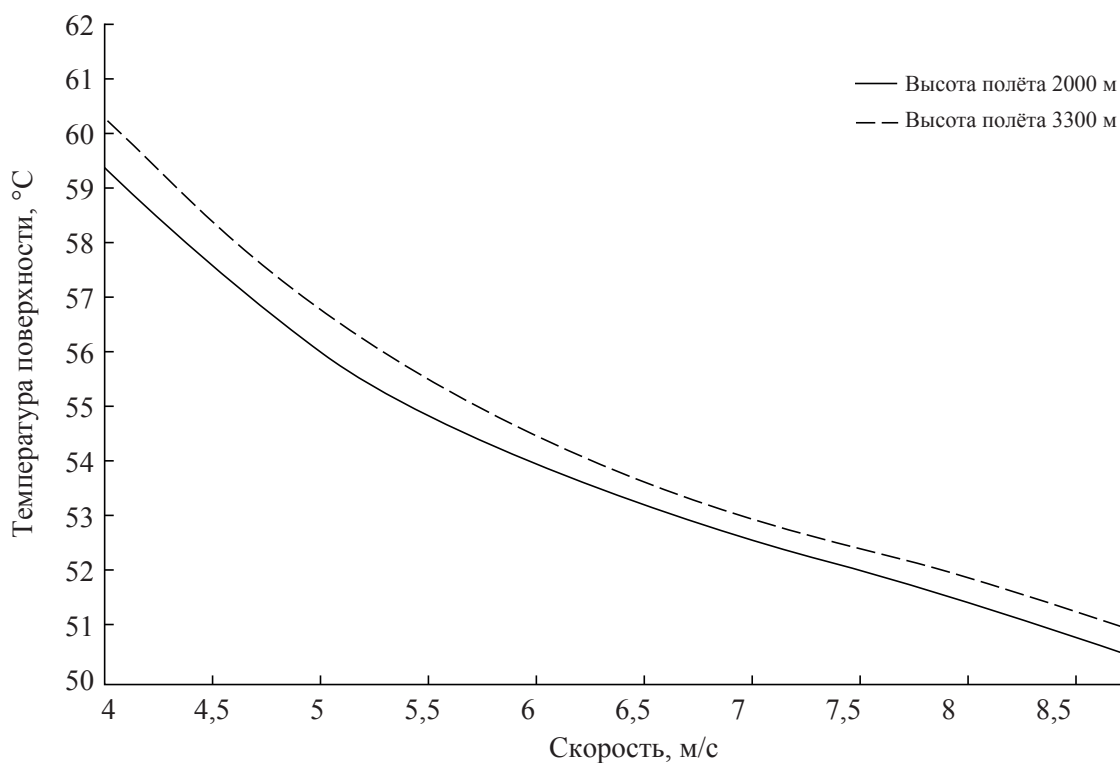


Рис. 6. Температура поверхности оборудования при температуре окружающего воздуха $t_{oc} = -60$ °C

в воздушные термоплаты, расположенные ближе ко входу воздуха, оказывается недостаточной для поддержания необходимой температуры поверхности оборудования.

Конструкция предложенного устройства воздушного охлаждения предполагает установку нескольких независимых участков один за другим. Можно показать, что

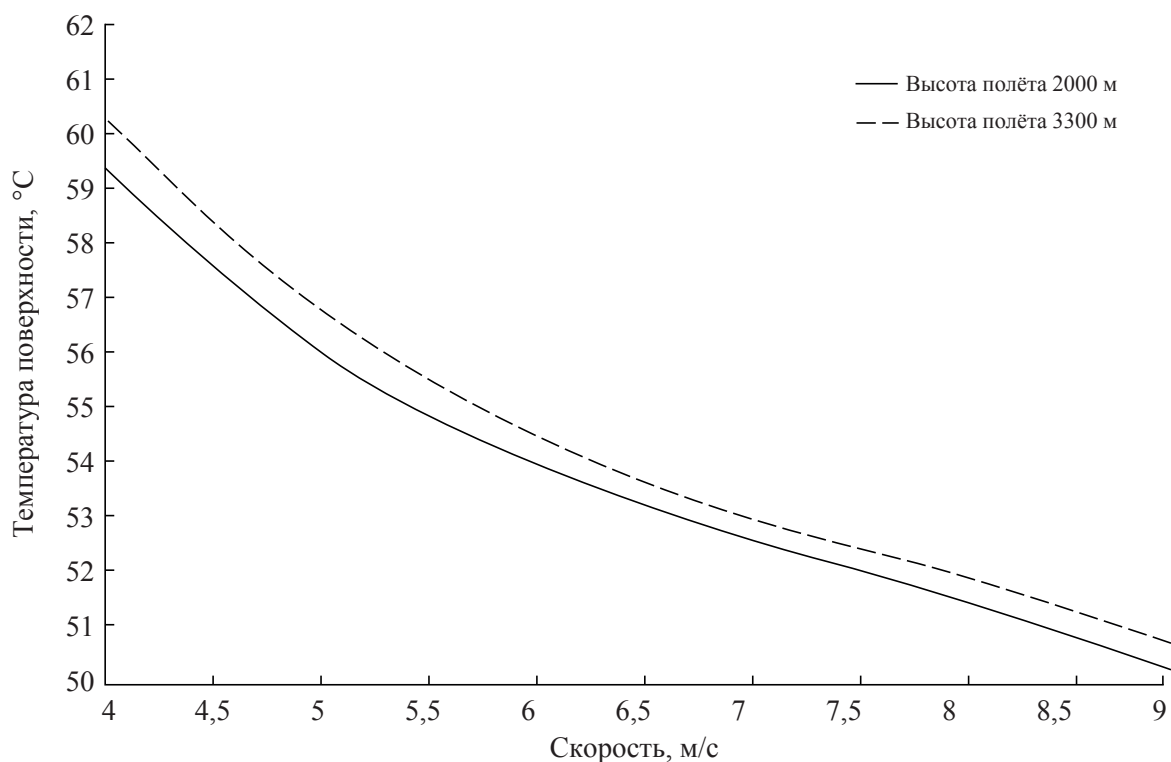


Рис. 7. Температура поверхности оборудования при температуре окружающего воздуха $t_{oc} = +35\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 1

Скорость воздуха на входе в воздушные термоплаты при высоте полёта 2000 м, м/с

Температура, °С Номер термопанели	-60	-40	-20	0	+20	+35
Скорость полёта 120 км/ч						
I	5.36	5.31	5.26	5.20	5.14	5.10
II	5.42	5.37	5.31	5.26	5.19	5.15
III	5.47	5.41	5.35	5.29	5.23	5.18
IV	5.50	5.44	5.38	5.31	5.25	5.20
V	5.50	5.44	5.38	5.32	5.25	5.20
VI	5.49	5.43	5.37	5.31	5.24	5.19
VII	5.46	5.41	5.35	5.29	5.22	5.17
VIII	5.57	5.50	5.44	5.37	5.30	5.25
Скорость полёта 180 км/ч						
I	8.00	8.04	8.04	8.03	7.97	7.92
II	8.05	8.11	8.12	8.13	8.06	8.01
III	8.09	8.15	8.17	8.20	8.13	8.08
IV	8.12	8.18	8.20	8.24	8.17	8.11
V	8.12	8.18	8.21	8.24	8.17	8.12
VI	8.11	8.17	8.19	8.23	8.16	8.10
VII	8.09	8.15	8.16	8.19	8.12	8.07
VIII	8.18	8.25	8.28	8.34	8.27	8.21

Таблица 2

Скорость воздуха на входе в воздушные термоплаты при высоте полёта 3300 м, м/с

Температура, °С Номертермопанели	–60	–40	–20	0	+20	+35
Скорость полёта 120 км/ч						
I	5.34	5.29	5.23	5.17	5.11	5.07
II	5.40	5.35	5.29	5.23	5.16	5.11
III	5.45	5.39	5.33	5.27	5.20	5.15
IV	5.47	5.41	5.35	5.29	5.22	5.17
V	5.48	5.42	5.36	5.29	5.22	5.17
VI	5.47	5.41	5.35	5.28	5.21	5.16
VII	5.44	5.38	5.32	5.26	5.19	5.14
VIII	5.54	5.48	5.41	5.34	5.27	5.22
Скорость полёта 180 км/ч						
I	8.02	8.05	8.03	8.01	7.94	7.89
II	8.08	8.12	8.11	8.10	8.03	7.98
III	8.12	8.17	8.17	8.17	8.10	8.04
IV	8.14	8.19	8.19	8.20	8.13	8.08
V	8.15	8.20	8.20	8.21	8.14	8.08
VI	8.14	8.19	8.19	8.20	8.12	8.07
VII	8.11	8.16	8.16	8.16	8.09	8.03
VIII	8.21	8.27	8.29	8.31	8.23	8.17

предложенная конструкция позволяет поддерживать допустимую температуру поверхности оборудования при суммарном тепловыделении ~50 кВт. При этом нет непосредственного контакта атмосферного воздуха с поверхностью аппаратуры, что повышает надёжность её работы. За счёт невысокого гидравлического сопротивления воздушного тракта устройства нет необходимости в установке дополнительного вентилятора. Отсутствие в конструкции теплообменников также приводит к значительному снижению массовых его характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложено устройство для воздушного охлаждения тепловыделяющей аппаратуры, расположенной снаружи летательных аппаратов и методика расчёта его тепло-гидравлических характеристик. Расчёты показывают, что с помощью подобного устройства возможно поддерживать температуру поверхности тепловыделяющей аппаратуры не выше 60 °С при температуре окружающего воздуха не более 35 °С при скоростях 120–180 км/ч на высотах 2000 до 3300 м при общем тепловыделении оборудования 50 кВт.

На предложенный способ воздушного охлаждения тепловыделяющей аппаратуры, расположенной снаружи летательных аппаратов, и системы для его реализации оформлен патент [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронин Г.И.* Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах. М.: Машиностроение, 1973. 444 с.
2. *Кудрявцева Н.С.* Основы проектирования эффективных систем терморегулирования космических аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2012. 228 с.
3. *Ягов В.В.* Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учебное пособие для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2014. 542 с.
4. Патент РФ № 2632057 // Изобрет. 2017. Способ воздушного охлаждения тепловыделяющей аппаратуры, расположенной снаружи летательных аппаратов, и система для его реализации. *Басов А.А., Дядькин А.А., Лексин М.А., Прохоров Ю.М.*

CONTENTS

Ulanov V.L., Sazonov D. Yu. Renewable energy sources as a risk factor for the development of Russian energy companies	3
Sukharev M.G. Models of interaction between power and gas supply systems at the present stage of energy development	14
Kononov Yu.D., Kononov D. Yu. Impact of forecasting horizon and uncertainty increase on the methods for competitiveness assessment of new power plants	21
Sukharev M.G., Kosova K.O. New diagnostic methods for pipeline system reliability and safety increasing according to flow parameters	31
Tsitsikyan G.N. About mutual inductance and electrodynamic forces of interaction of coaxial circuits	40
Sergeev V.V., Vladimirov Ia.A., Zyssin L.V. Some topical theoretical and practical issues of transition to bivalent systems improving the centralized heat supply	46
Krylov A.L., Nosov A.V., Aron D.V., Merkushev V.P. Development of computational software system “Bakis” for solving aquatic radioecological problems	57
Dranikov I.L. Dykhne problem for heat	70
Kartashov E.M., Nenakhov E.V. Thermal response of a massive body to heat stroke on the basis of the hyperbolic type equations	73
Zaichenko V.M., Kiverin A.D., Smygalina A.E., Tsyplakov A.I. Combustion of lean hydrogen-based mixtures in spark ignition engine	87
Belonogov O.B. Investigation of the influence of structural and adjusting parameters of a quadruple-orifices electrohydraulic amplifier on the static characteristics of rocket pack steering actuator	100
Onufrieva E.V., Onufriev V.V., Grishin Yu.M., Sidnyaev N.I., Sinyavsky V.V., Ivashkin A.B. About calculation the voltage of ignition of back arc – discharge into high-voltage plasma thermion diode	108
Basov A.A., Velyukhanov V.I., Koptelov K.A., Patsievskiy A.A. Application of average-pressure thermostabilization plants for panel-based spacecraft during on-ground tests	116
Basov A.A., Leksin M.A., Prohorov Y.M., Miakochin A.S. Appliance for air cooling of heat-generating equipment. Method of calculating of heat and hydraulic characteristics	125