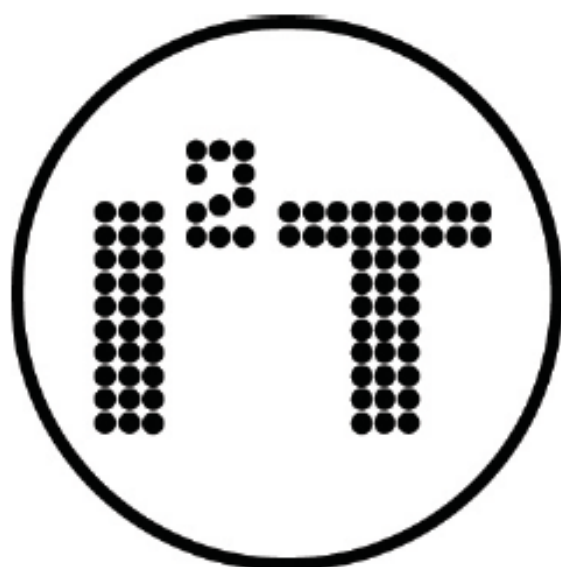


**International Scientific – Practical Conference
«INNOVATIVE INFORMATION
TECHNOLOGIES»**



**PART 2
INNOVATIVE INFORMATION TECHNOLOGIES IN
SCIENCE**

**Prague – 2013
April 22-26**

К 32.97
УДК 681.3; 681.5
И 64

- И 64 **Иновационные информационные технологии: Материалы международной научно-практической конференции. Том 2.** / Гл. ред. С.У. Увайсов; Отв. ред. И.А. Иванов–М.:МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013, 596 с.
- I 64 **Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific – practical conference. Part 2.** /Ed. Uvaysov S. U., Ivanov I. A. –М.: MIEM NRU HSE, 2013, 596 p.

ISSN 2303-9728

Представлены материалы второй международной научно-практической конференции, отражающие современное состояние инновационной деятельности в образовании, науке, промышленности и социально-экономической сфере с позиций внедрения новейших информационных технологий.

Представляет интерес для широкого круга научных работников, преподавателей, аспирантов, студентов и специалистов в области инноватики и современных информационных технологий.

The materials of The Second International Scientific – Practical Conference is presented below. The Conference reflects the modern state of innovation in education, science, industry and social-economic sphere, from the standpoint of introducing new information technologies.

Digest of Conference materials is presented in 4 parts. It is interesting for a wide range of researchers, teachers, graduate students and professionals in the field of innovation and information technologies.

Редакционная коллегия:

А.Е. Абрамешин, О.А. Авдеюк, В.Н. Азаров, А.В. Белов, К.И. Бушмелева, Г.А. Воробьев, Л.А. Гамза, А.П. Горбунов, Е.Г. Гридина, В.В. Губарев, А.Л.Деньшиков, А.П. Журков, И.А. Иванов, В.А. Камаев, Л.Н. Кечиев, А.Ф.Коперко, Ю.Н. Кофанов, А.Е. Краснов, В.П. Кулагин, В.А. Левин, Б.Г. Львов, В.И. Нефедов, Н.Н. Новиков, Е.Д. Пожидаев, И.В. Роберт, Ю.А. Романенко, С.Ю.Рошин, А.Н. Савкин, В.С. Саенко, А.С. Сигов, В.П. Симонов, А.П.Смоляков, А.Н. Тихонов, С.Р. Тумковский, С.У. Увайсов (гл. ред.), С.П. Халютин, Е.Н.Черемисина, Н.К.Юрков.

ISSN 2303-9728

ББК 32.97
© Оргкомитет конференции
© МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013

МЕТОД ВЫБОРА АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Гольяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Коновалов С.Ф., Соловьева Т.И., Томилин А.В.
ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»; МГТУ им. Н.Э.Баумана; МИЭМ НИУ
ВШЭ

Рассматривается метод всесторонней поэтапной оценки характеристик акселерометра для применения в лазерной бесплатформенной инерциальной навигационной системе нового поколения. Приводятся результаты исследований и сравнительных испытаний кремниевых и кварцевых акселерометров различных типов. Рассматриваются достоинства и недостатки акселерометров, связанные с материалом маятника, и их влияние на характеристики, определяющие класс точности инерциальной навигационной системы и ее место среди инновационных бесплатформенных систем.

The method of accelerometer choosing for laser strapdown inertial navigation system of new generation and the results of comparative tests of various accelerometers. Golyaev Yu.D., Kolbas Yu.Yu., Konovalov S.F., Solovieva T.I., Tomilin A.V.

The comprehensive step-by-step method of the accelerometer choosing for the laser strapdown inertial navigation system of new generation is considered. The results of Si-flex and Q-flex accelerometers research and comparative tests are presented. The advantages and the problems of the above accelerometers connected with pendulum material are described and its influence on the accelerometers accuracy parameters as well as inertial navigation systems's accuracy class and its place among innovative sstrapdown systems are considered.

Введение

Системы ориентации и навигации являются информационной основой современных систем автоматического управления подвижными объектами.

Инерциальная навигационная система (ИНС) обеспечивает непрерывную выработку информации о курсе, координатах, скорости движения и параметрах угловой ориентации объекта, на котором установлена ИНС. В последние десятилетия наиболее распространенным типом ИНС стали бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) [1]. Они широко применяются в аэрокосмической технике.

Требования к точности БИНС постоянно повышаются. Особенно серьезные проблемы возникают, когда для оптимального и эффективного решения задач управления необходимо обеспечивать получение информации о параметрах движения с высокой точностью при работе в большом диапазоне ускорений и в жестких условиях эксплуатации, порождающих специфические погрешности датчиков БИНС – гироскопов и акселерометров.

Для компенсации погрешностей датчиков предварительно устанавливается модель их ошибок, для каждого датчика определяются коэффициенты этой модели, которые затем используются в алгоритме обработки их выходной информации в БИНС.

Для инновационных БИНС с повышенной точностью и малым временем готовности принципиально важным является то, что датчики в них работают в переходном режиме при сильно меняющемся смещении нуля как реакции на

внутренние температурные изменения; этот фактор накладывает особые требования к формированию модели погрешностей датчиков.

Таким образом, задача выбора акселерометров для таких систем становится многофакторной. В данной работе рассматривается метод всесторонней поэтапной оценки характеристик акселерометра, позволяющий сделать оптимальный выбор акселерометров для инновационных БИНС с повышенной точностью и малым временем готовности, работающих в большом диапазоне ускорений и в жестких условиях эксплуатации.

Метод поэтапной оценки характеристик акселерометра

Для того, чтобы оценить возможность применения серийно выпускаемых акселерометров в разрабатываемой БИНС или выявить необходимость их доработки для обеспечения соответствия требуемым характеристикам, необходимо провести анализ их свойств в следующей последовательности:

- изучить конструктивные особенности и свойства материалов, из которых изготавливаются детали акселерометра, для предварительной оценки их прочностных характеристик и чувствительности к температурным изменениям;
- проанализировать технологичность конструкции, серийноспособность и экономичность производства конкретного типа прибора;
- определить наиболее критичные для данного применения параметры акселерометра, от которых будет зависеть точность системы;
- разработать методики измерения этих параметров и изучить характер их изменения в диапазоне рабочих температур;
- на основании модели ошибок акселерометра разработать алгоритм компенсации воспроизводимых погрешностей акселерометра для стационарного режима работы;
- исследовать влияние внешних воздействующих факторов при работе акселерометра в стационарном режиме, компенсируя собственные погрешности; при обнаружении недопустимого роста погрешностей из-за чувствительности к определенным параметрам внешних воздействий найти методы их компенсации с помощью конструктивных решений или алгоритмической коррекции;
- исследовать поведение акселерометра в диапазоне возможных ускорений, предварительно выведя его в стационарный режим для завершения собственных тепловых процессов и компенсируя алгоритмически его собственные систематические погрешности;
- разработать алгоритм компенсации воспроизводимых погрешностей акселерометра для переходного режима его работы, что обеспечит возможность использования акселерометра при малых временах готовности.

Сравнительный анализ особенностей акселерометров, обусловленных конструкционными материалами

Наиболее перспективными для применения в системах, в которых требуется обеспечивать высокую точность при работе в большом диапазоне ускорений и в жестких условиях эксплуатации, являются компенсационные акселерометры с маятниками, изготовленными из кремния или кварца.

Конструктивные схемы кремниевых и кварцевых акселерометров схожи. Основными элементами конструкции являются маятниковый узел, состоящий из установочной рамки, упругого подвеса и лопасти, емкостной датчик угла и магнитоэлектрический датчик момента, который обеспечивает компенсацию отклонения лопасти маятника под воздействием ускорения [2,3].

Ключевую роль в различии характеристик двух типов акселерометров играет материал маятника. При этом следует иметь в виду главную особенность

конструкционных материалов маятника. Она заключается в разных величинах температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) у кремния и у кварца. Очевидное преимущество кварца, имеющего меньший ТКЛР, чем у кремния, способствует получению малого дрейфа нуля в переходных тепловых режимах у кварцевых акселерометров. К тому же ТКЛР плавленого кварца практически равен ТКЛР материала магнитопровода магнитной системы акселерометра, выполненной из суперинвара 32НКД, в то время как ТКЛР кремния превышает его почти в 5 раз, что вызывает проблемы базирования кремниевых маятников на суперинваровых деталях, а использование магнитопроводящих сплавов с ТКЛР, близким к кремнию, не дает положительного эффекта из-за больших вариаций ТКЛР этих материалов при малых изменениях в составе сплавов.

В то же время кремний до последнего времени имел ряд очевидных технологических преимуществ перед кварцем, как в силу использования MEMS технологии, так и в силу дешевизны и доступности заготовок, в качестве которых используются стандартные кремниевые «вафли» электронной промышленности.

Дополнительно отметим, что кремний обладает существенно более высокой теплопроводностью и является электропроводящим материалом, что позволяет использовать лопасть кремниевого маятника как подвижного электрода емкостного датчика угла без напыления на поверхность маятника металлических электродов и токоподводов к ним.

Более детальное сравнение свойств кварца и кремния, обусловленных различием материалов, приводится в работах [3, 4].

Проведенный анализ показал, что на сегодняшний день кремний является более технологичным материалом и позволяет получить более дешевую продукцию. Вместе с тем кремний уступает плавленому кварцу по возможности обеспечивать более высокие точностные характеристики приборов.

Из изложенного видно, что отдать приоритет одному или другому типу акселерометров для применения в конкретной системе не представляется возможным без проведения сравнительных испытаний приборов на основе как кремния, так и кварца.

Выбор моделей акселерометров для проведения сравнительных испытаний

Исходя из специфики применения систем, требующей обеспечения малого времени готовности после подачи питания (как следствие – отсутствие термостата) в условиях широкого диапазона ускорений и температур, для БИНС были выбраны маятниковые газонаполненные приборы. К ним относятся кварцевые акселерометры типа QA-2000, QA-3000, А-18, ВА-3, АК-6, а также вновь разработанные АК-15, А-18Т и Е-1.

Определение наиболее критичных для данного применения параметров акселерометра

Поскольку в разрабатываемых БИНС невозможна калибровка по каналам акселерометров перед началом использования, важнейшую роль приобретает невоспроизводимость параметров акселерометров, а именно масштабного коэффициента, смещения нуля и двух углов, определяющих положение базовой плоскости. Ошибки тем более возрастают после воздействия предельных повышенных и пониженных температур, поскольку при этом складываются температурные гистерезисы параметров с кратковременными и долговременными нестабильностями [5].

Именно поэтому для первичной оценки пригодности акселерометров к применению в БИНС были избраны невоспроизводимость вышеуказанных параметров после воздействия предельных как повышенных, так и пониженных температур.

Подробное исследование различных типов акселерометров приводится далее.
Сравнительный анализ параметров акселерометров

В настоящее время имеются как серийно выпускаемые, так и вновь освоенные в производстве акселерометры, близкие по параметрам требованиям для акселерометров в БИНС: невоспроизводимость масштабного коэффициента $9 \cdot 10^{-5}$ отн.ед., невоспроизводимость смещения нуля $8 \cdot 10^{-5}$ g, изменение углов ориентации базовой плоскости $\pm 40''$. Характеристики имеющихся на российском рынке акселерометров с параметрами, близкими согласно ТУ или рекламным проспектам к указанным выше, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики акселерометров по ТУ или рекламным проспектам

Наименование параметра	Ед. изм.	Требования	A-18	AK-15	BA-3	A-18T	AK-6	E1	AK-18 (эксп.)
Невоспроизводимость масштабного коэффициента	Отн. ед.	$9 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-5}$	$24 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Невоспроизводимость смещения нуля	g	$8 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$16 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Изменение углов ориентации базовой плоскости	"	± 40	± 30	± 4	± 20	± 10	± 10	± 20	± 5
Диапазон измеряемых ускорений	g	± 35	± 40	± 20	± 50	± 40	± 20	± 50	± 35
Диапазон рабочих температур	°C	-50...+85	-60...+80	-60...+70	-55...+85	-50...+85	-60...+80	-55...+85	-55...+85
Материал маятника			кремний	кварц	кварц	кремний	кварц	кварц	кварц
Производитель			ИТТ	МИЭА	Электрооптика	ИТТ	Серп. завод Металлист	Китай	Серп. завод Металлист

Предварительные проверки акселерометров, представленных в таблице 1, показали, что их параметры не всегда соответствуют рекламируемым. Поэтому потребовалась разработка специальной методики для проведения их тщательного анализа в температурном диапазоне. Этой методикой предусматривается измерение невоспроизводимости параметров с высокой точностью в связи с тем, что данная характеристика не подлежит алгоритмической коррекции и окажет решающее влияние на точность канала акселерометров БИНС.

Методика испытаний акселерометров

При проведении испытаний на невоспроизводимость параметров была использована методика, состоящая из 5 этапов, подробно описанная в [6]. Акселерометры закреплялись на делительной головке в камере тепла и холода. Проводились измерения масштабного коэффициента, смещения нуля и углов отклонения базовой плоскости акселерометров последовательно при температурах $+25$ °C, -50 °C, $+25$ °C, $+75$ °C, $+25$ °C. При каждой температуре приборы предварительно выдерживались в камере в течение 2 часов в выключенном состоянии, затем включались, и далее через 1,5 часа после начала работы проводились измерения параметров с тем, чтобы все внутренние тепловые процессы завершились, и акселерометры определенно вышли в стационарный режим.

По пяти полученным для каждого акселерометра значениям рассчитывались температурная зависимость масштабного коэффициента, смещения нуля и углов отклонения базовой плоскости (полином второго порядка). Для трех значений при $+25$ °C рассчитывалась невоспроизводимость этих параметров, равная максимальному

отклонению от температурной зависимости. Такая методика позволяет учесть все температурные погрешности до третьего порядка малости и обеспечить необходимую точность измерения в камере тепла и холода, имеющей погрешность установки температуры $\pm 10^{\circ}\text{C}$.

Результаты испытаний параметров акселерометров приведены в таблице 2. По каждому параметру указаны диапазоны значений, полученных для нескольких образцов акселерометров, которые одновременно участвовали в испытаниях.

Таблица 2
Характеристики акселерометров по результатам испытаний

Наименование параметра	Ед. изм.	A-18	AK-15	A-18T	AK-6	E1	AK-18
Невоспроизводимость масштабного коэффициента	Отн. ед.	$(10-15) \cdot 10^{-5}$	$(16-18) \cdot 10^{-5}$	$(3-5) \cdot 10^{-5}$	$(3-7) \cdot 10^{-5}$	$(1-24) \cdot 10^{-5}$	$(5-8) \cdot 10^{-5}$
Невоспроизводимость смещения нуля	g	$(15-19) \cdot 10^{-5}$	$(1-3) \cdot 10^{-5}$	$(15-28) \cdot 10^{-5}$	$(4-8) \cdot 10^{-5}$	$(4-6) \cdot 10^{-5}$	$(4-5) \cdot 10^{-5}$
Изменение углов ориентации базовой плоскости	"	$\pm(20-32)$	$\pm(21-24)$	$\pm(9-13)$	$\pm(3-6)$	$\pm(10-12)$	$\pm(5-6)$

Заключение по результатам испытаний

Из всех представленных на испытания приборах ни один из серийно выпускаемых акселерометров не соответствует полностью требованиям, предъявляемым к каналу акселерометров разрабатываемой БИНС, однако в разной степени.

Акселерометр АК-6 соответствует требованиям для инновационной БИНС, за исключением диапазона измеряемых ускорений.

Акселерометр А-18 не соответствует требованиям для разрабатываемой БИНС по параметрам невоспроизводимости масштабного коэффициента, невоспроизводимости смещения нуля, изменению углов ориентации базовой плоскости; опытный образец акселерометра А-18Т не соответствует требованиям по параметру невоспроизводимости смещения нуля.

Акселерометр АК-15 не соответствует требованиям по параметрам невоспроизводимости масштабного коэффициента и диапазону измеряемых ускорений.

Акселерометр Е1 не соответствует требованиям по параметру невоспроизводимости масштабного коэффициента (пять приборов из шести). В то же время небольшая часть приборов Е1 показывает исключительно высокие точностные характеристики, что свидетельствует, с одной стороны, об удачной конструкции, являющейся копией американского кварцевого акселерометра QA-3000, а с другой – о неотработанности технологии производства этих акселерометров.

Необходимо отметить, что все испытанные акселерометры, кроме АК-6, А-18 и АК-15, реально не соответствуют указанным в рекламных проспектах и ТУ параметрам.

Следует отметить высокие точностные характеристики, продемонстрированные экспериментальными образцами акселерометра АК-18 (ОАО «Серпуховский завод «Металлист»), которые не только соответствуют требованиям БИНС, но и по некоторым параметрам (температурный диапазон, погрешность базы) превзошли лучшие мировые образцы. В случае доведения их до серийного производства разработчики получат высококачественный продукт мирового уровня.

Выводы

Все акселерометры с маятником из кремния не соответствуют требованиям по параметру невоспроизводимости смещения нуля. Это, по-видимому, является

недостатком, принципиально присущим акселерометрам с конструктивной схемой, используемой в А-18, поскольку известны акселерометры с кремниевым маятником, имеющие высокую стабильность нуля [2,7,8].

В то же время все акселерометры с маятником из кварца соответствуют требованиям по параметрам невоспроизводимости смещения нуля и изменения углов ориентации базовой плоскости, а остальные параметры весьма близки к требуемым.

Соответствие требованию по параметрам невоспроизводимости масштабного коэффициента и диапазону измеряемых ускорений для приборов с маятником из кварца определяется искусством конструктора и является вполне достижимым, особенно при использовании современных магнитов с малым температурным гистерезисом.

Организация группового изготовления кварцевых маятников из серийно выпускаемых кварцевых заготовок (вафель) большого диаметра при минимуме ручных операций с использованием MEMS технологий позволит устранить недостаток кварца по сравнению с кремнием – невозможность использования групповых технологий и существенно уменьшит стоимость кварцевых акселерометров по сравнению со сложившимися на российском рынке ценами. При этом отсутствие операций механической обработки маятников будет способствовать увеличению точности приборов.

Поскольку наиболее приближен по точностным параметрам к требованиям инновационной БИНС именно АК-18, следует взять именно его для оснащения инновационной БИНС с рекомендацией внедрения для его производства новейших групповых технологий, обеспечивающих повышение производительности и снижение стоимости. Увеличение диапазона измерений АК-6 достигается без внесения существенных конструктивных изменений. Для уменьшения времени прогрева и повышения стабильности смещения нуля следует вынести за пределы корпуса собственно акселерометра основные тепловыделяющие элементы, прежде всего силовую часть электроники усилителя обратной связи. Проведение этих очевидных доработок позволит производить серийные отечественные акселерометры АК-18, полностью обеспечивающие требования к акселерометрическому тракту инновационной БИНС.

На следующих этапах исследований планируется провести испытания доработанных акселерометров АК-18 при механических воздействиях и в широком диапазоне ускорений, а также разработать алгоритм компенсации воспроизводимых погрешностей акселерометра для переходного режима его работы, что обеспечит дальнейшее повышение точностных характеристик акселерометра при малых временах готовности.

Литературы

1. N.M. Barbour, J.M. Elwell, R.H. Setterlund, G.Schmidt. Inertial instruments: where to now? // The 1st Saint Petersburg International Conference on Navigation. 1994.
2. Коновалов С. Ф., Польшков А. В., Сео Дж. Б. и др. Опыт разработки малошумящего акселерометра // Гироскопия и навигация, 2000, №3(30), С. 68-77. ISSN 0869-7035.
3. Сео Дже Бом. Оптимизация параметров и моделирование рабочих режимов в компенсационных акселерометрах типа Q-flex и Si-flex. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2012 г.
4. Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Коновалов С.Ф., Томлин А.В., Соловьева Т.И. Критерии выбора акселерометров для инерциального измерительного блока. // Сетевой электронный научный журнал «Системотехника», №10, 2012 г.

5. Соловьева Т.И., Томилин А.В. Исследование точностных характеристик акселерометров А-18 в режиме, соответствующем малым значениям времени готовности. // Вопросы оборонной техники. Научно-технический сборник, сер.9, ФГУП НТЦ «Информтехника», 2011 г., с.63 – 70

6. Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Коновалов С.Ф., Томилин А.В., Соловьева Т.И. Исследования и сравнительные испытания акселерометров в инерциальном измерительном блоке.// Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования и инфотелекоммуникационных технологий в инновационных проектах (ИННОВАТИКА-2012). Труды Международной конференции и Российской научной школы. Часть 1/Под ред. Кофанова Ю.Н. – Ивanteeвка М.о.: Издательство НИИ предельных технологий, 2012 г., с.38-43

7. Pat. 6073490 (USA), Int. C1.7 G 01 P 15/00. Servo accelerometer / S. F. Konovalov, G. M. Novosyolov, A. V. Polynkov, C. O. Lee, J. H. Oh, K. S. Lee; Sergey Feodosievich. – No 08/765576; 1994.

8. Pat. 6422076 B1 (USA), Int. C1.7 G 01 P 15/08. Compensation pendulous accelerometer / V. M. Prokofiev, S. F. Konovalov, Jae-Beom Seo et al; Agency For Defense Development, Taejon (KR); Sergei Feodosievich Konovalov, Moscow (RU). – No 09/598386; Jul. 23. 2002.

УЧЕТ СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ ПОТЕНЦИАЛЬНО-ПОТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Старостин И.Е.

Москва, Экспериментальная мастерская НаукаСофт

Рассматриваются вопросы учета случайных факторов при моделировании неравновесных процессов в замкнутых неравновесных системах потенциально-потокным методом. В состояниях, далеких от устойчивого равновесного состояния, случайные флуктуации могут качественно изменить характер динамики системы – дальнейшее качественное поведение рассматриваемой системы возможно предсказать лишь с некоторой вероятностью. Учет случайных факторов производится путем добавления в потенциально-потокные уравнения случайных сил и учетом случайных изменений матрицы восприимчивостей в зависимости от случайных изменений условий протекания неравновесных процессов.

Accounting for random factor in Modeling of nonequilibrium processes potentially streaming method. Starostin I.E.

Questions of accounting of random factors in the simulation of non-equilibrium processes in closed non-equilibrium systems potentially streaming method. In states far from stable equilibrium, random fluctuations can qualitatively change the nature of the dynamics of the system - further qualitative behavior of the system can be predicted with a certain probability. Accounting for random effects produced by the addition of a potentially streaming equation random forces and considering the random change in the susceptibility of the matrix equations, depending on the course of random changes in the conditions of non-equilibrium processes.

В природе часто встречаются далекие от равновесия системы, обменивающиеся с другими системами веществом и энергией. В таких системах состояния, далекие от