



ISSN: 2658–5782

Номер 2

2025

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





К 85-летию академика Роберта Искандеровича Нигматулина

А.А. Губайдуллин¹ ✉, Д.А. Губайдуллин², А.А. Аганин²

¹ Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Тюмень, Россия

² Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

E-mail: a.a.gubaidullin@yandex.ru

On the 85th anniversary of academician Robert Iskanderovich Nigmatulin

A.A. Gubaidullin¹ ✉, D.A. Gubaidullin², A.A. Aganin²

¹ Tyumen Branch of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

² Institute of Mechanics and Engineering: Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

E-mail: a.a.gubaidullin@yandex.ru



17 июня 2025 года исполняется 85 лет выдающемуся ученому, механику и математику, академику Роберту Искандеровичу Нигматулину.

Наибольший вклад его работы внесли в решение таких фундаментальных проблем как: математическое моделирование динамики многофазных сред; гидро- и газодинамика паро- и газожидкостных систем; горение, детонация и взрыв в дисперсных средах; фильтрация многофазных жидкостей; динамика упругопластических сред с физико-химическими превращениями. Под руководством Р.И. Нигматулина выполнены актуальные исследования и разработки по проблемам безопасности энергетических и технологических систем, новым методам добычи нефти и газа, повышения нефтеотдачи пластов, повышения эффективности и интенсификации технологических процессов в энергетике, нефтепереработке, химической технологии и взрывном деле.

Р.И. Нигматулиным предложены оригинальная общая постановка проблемы движения гетерогенных сред, описания внутрифазных и межфазных процессов, основанные как на методах осреднения микроуравнений, так и на феноменологических методах, а также метод построения замкнутых систем уравнений динамики и термодинамики различных типов гетерогенных сред. При этом удалось выделить важный класс движения смесей, содержащих газовую фазу, в которой реализуется однородное давление, изменяемое во времени. Этот класс назван гомобарическим, и для него удается упростить систему уравнений динамики смеси и получать решения соответствующих краевых задач аналитическими или простыми численными методами.

Наиболее ярко эффекты неоднородности проявляются при распространении волн. Р.И. Нигматулиным с коллегами установлены законы распространения различных видов волн (волн сжатия, разрежения, горения, детонации) в двухфазных системах различной структуры и обнаружен ряд новых эффектов. Показано существование ударных волн непрерывной монотонной и осцилляционной структуры, когда большую роль играют эффекты нестационарности структуры волны. Обнаружена определяющая роль межфазного тепло- и массообмена при распространении ударных волн в пузырьковых средах. Установлен механизм аномального усиления или кумуляции ударных волн в кипящих жидкостях. Теоретически предсказано существование различных типов детонационных волн в горючих аэрозвесах и даны условия их реализации. Поставлен ряд задач об истечении парожидкостных смесей и кипящих жидкостей из объемов, находящихся под большим давлением, и предложены эффективные методы их решения. Сформулированы условия критического истечения парожидкостной смеси.

Исследованиями, выполненными под руководством Р.И. Нигматулина, установлен механизм закоксовывания трубчатых печей для нагрева углеводородного сырья, который связан не только с кинетикой химических реакций, но и с гидродинамикой газожидкостного потока. В результате были предложены меры по предотвращению указанного явления и новые принципы конструирования печей.

Р.И. Нигматулин развил теорию скоростного деформирования твердых тел при наличии в них полиморфных превращений, образования и движения дислокаций, упрочнения металлов при взрывных нагрузках. Им впервые была поставлена и решена задача о высокоскоростном соударении упруго-пластических тел, претерпевающих фазовые переходы, когда возникает многоволновая картина движения. При этом был предсказан ряд эффектов, которые впоследствии были подтверждены экспериментом. В результате тщательного исследования была доказана определяющая роль фазовых переходов при аномальном упрочнении малоуглеродистой стали взрывом; получены уравнения, описывающие сверхпластичность; предложен теоретико-экспериментальный метод определения кинетики дислокационных процессов исходя из решения обратных задач.

Р.И. Нигматулиным с коллегами развита теория распространения акустических волн в пузырьковых жидкостях. Установлены основные закономерности распространения и затухания акустических волн в пузырьковых жидкостях в зависимости от вида жидкости, размеров пузырьков, их парогазового содержимого, теплообмена на их поверхности. Создана теория распространения нелинейных волн в пузырьковых жидкостях. Установлены закономерности распространения таких жидкостей плоских волн. Выявлены особенности взаимодействия плоских волн с границей между пузырьковой жидкостью и чистой жидкостью, их воздействия на

пузырьковые кластеры, их отражения от твердых стенок. Установлено, что если на акустические волны пузырьковый слой у стенки оказывает в основном экранирующее воздействие, то в случае нелинейных волн этот эффект несколько ослабевает, а в некоторых случаях амплитуда волны может даже возрастать. Показано, что при покрытии стенки пузырьковым слоем с определенным радиусом пузырьков и их объемным содержанием можно добиться как предотвращения отражения, так и существенного снижения воздействия на стенку.

Р.И. Нигматулиным предложен метод реализации сверхсжатия пузырьков неперiodическим резонансным возбуждением (воздействием на стенку сферического резонатора в такт с расширением и сжатием пузырька). Установлено, что по мере увеличения влияния сжимаемости жидкости применимость этого метода сильно усложняется. Под руководством Р.И. Нигматулина разработаны широкодиапазонные уравнения состояния жидкой и паровой фаз воды, ацетона, бензола и тетрадекана. Без таких уравнений невозможно проведение теоретических исследований динамики указанных жидкостей и их пара при больших изменениях давления и температуры, особенно в условиях, когда имеется граница раздела фаз, на которой происходит теплообмен. Разработана теория эволюции несферических возмущений поверхности пузырьков при их сверхсильном сжатии. Установлено, что существенную роль в ограничении роста амплитуды несферических возмущений поверхности пузырьков при сжатии играет вязкость жидкости. Показано, что с повышением температуры жидкости рост амплитуды возмущений снижается. Установлено, что при сильном сжатии кавитационных пузырьков в ацетоне амплитуда возмущений растет намного медленнее, чем в воде, что соответствует результатам экспериментов по нейтронной эмиссии при акустической кавитации дейтерированного ацетона.

Р.И. Нигматулин внес фундаментальный вклад в разработку теории экстремальной кумуляции энергии и сверхсжатия среды в кавитационных пузырьках при коллапсе. Показано, что для реализации такой кумуляции необходимо образование в пузырьках радиально-сходящихся ударных волн, посредством схождения которых к центру пузырьков и отражения от него и достигается сверхвысокая степень кумуляции энергии в малой центральной области пузырьков. Наряду с этим в ходе коллапса пузырьки и радиально-сходящиеся в них ударные волны должны быть близки к сферическим, иначе сферическая кумуляция будет расфокусирована, так что вместо нее может быть реализована цилиндрическая кумуляция или столкновение плоских ударных волн. Показано, что реализацию экстремальной кумуляции предпочтительнее осуществлять в кластере, поскольку в таком случае сжимающее давление выше, чем при воздействии на одиночный пузырек. При этом лучше использовать жидкости с большим молекулярным весом и малым показателем адиабаты пара (ацетон, бензол, тетрадекан), так как в паре таких жидкостей скорее образуются сходящиеся ударные волны. Данная

теория имеет большие перспективы для приложений, в частности, в химии, поскольку при экстремальной кумуляции в пузырьках достигаются уникальные условия для химических реакций: плотности, сравнимые с плотностями твердых тел; температуры выше, чем на поверхности солнца; давления более высокие, чем в самых глубоких местах мирового океана. Уникальность пузырьковой кумуляции заключается еще и в рекордно больших скоростях повышения и понижения давлений и температур, что также очень важно для химии. Под руководством Р.И. Нигматулина разработана теория гидродинамического взаимодействия между пузырьками. Показано, что несферичность пузырьков в центральной области пространственного кластера при расширении и сжатии пузырьков под действием гармонического изменения давления жидкости оказывается меньше, чем в центральной области линейного стримера, что находится в соответствии с результатами экспериментов по нейтронной эмиссии при акустической кавитации дейтерированного ацетона. Р.И. Нигматулиным с коллегами создана теория динамики пузырьковых кластеров как дискретного множества пузырьков. Показано, что при гармоническом воздействии на кластер закон изменения давления жидкости в центральной области кластера может сильно отличаться от гармонического, а сжимающее пузырьки давление жидкости может значительно превышать амплитуду гармонического воздействия. Р.И. Нигматулин с коллегами развил теорию динамики пузырьковых кластеров также и в рамках модели сплошной среды. Показано, что пузырьковые кластеры могут фокусировать в своей центральной области энергию распространяющейся по жидкости плоской волны сжатия, в результате чего давление в центральной области кластера может быть намного больше давления в падающей волне.

Р.И. Нигматулиным совместно с группой американских коллег выполнены экспериментальные исследования сверхсжатия пузырьков при акустической кавитации дейтерированного ацетона, в которых впервые были зафиксированы нейтронная эмиссия и производство ядер трития, являющихся свидетельством реализующихся в пузырьках термоядерных актов. Данные результаты имеют огромное фундаментальное значение.

Рассмотрены гидро- и термодинамические уравнения для атмосферы в метеорологических или климатических масштабах, когда силы инерции пренебрежимо малы по сравнению с силой тяжести и сказывается инерция горизонтальной скорости и температуры. Для такого квазистатического по вертикали течения получено асимптотически точное уравнение для распределения вертикальной скорости по распределению плотности, температуры и горизонтальных скоростей. Выведена замкнутая система уравнений гидро- и термодинамики, в которой давление в каждой точке определяется весом столба воздуха над этой точкой. Именно эта система уравнений должна использоваться для расчетов климатических и метеорологических процессов, в которых существенную роль играет инерция горизонталь-

ной скорости и безынерционная вертикальная скорость.

Р.И. Нигматулин является создателем и руководителем признанной в мире научной школы по механике многофазных систем (подготовил 28 докторов наук и 50 кандидатов наук). Роберт Искандерович входит в состав Российских национальных комитетов по теоретической и прикладной механике, по тепло- и массообмену, международного комитета по многофазным течениям, редколлегий ряда отечественных и зарубежных журналов.

Р.И. Нигматулин является автором свыше 260 научных публикаций и изобретений, среди которых десять монографий и учебников. Его монографии являются настольными книгами специалистов, работающих в области механики и теплофизики гетерогенных сред. Учебник «Механика сплошной среды» стал одним из основных учебников для студентов-механиков в университетах России.

В монографии [1] последовательно изложены теоретические основы, которые необходимы для понимания и расчета движения гетерогенных или многофазных смесей в разнообразных ситуациях. Такие смеси широко представлены в различных природных процессах и областях человеческой деятельности. Подробно изложены вопросы вывода уравнений движения, реологии и термодинамики гетерогенных сред. Для этого рассмотрены как феноменологический метод, так и более глубокий метод осреднения. Получены замкнутые системы уравнений для монодисперсных смесей с учетом вязкости, сжимаемости фаз, фазовых переходов, относительного движения фаз, радиальных пульсаций пузырей, хаотического движения и столкновения частиц и других эффектов. Рассмотрены уравнения и постановки задач применительно к твердым пористым средам, насыщенным жидкостью. Описаны имеющиеся в современной литературе решения задач о движении и тепло- и массообмене около капель, частиц, пузырьков. Монография пользуется большим спросом у научных и инженерно-технических работников, занимающихся механикой и работающих в энергетике, космической и атомной технике, химической технологии, нефтегазодобывающей промышленности, взрывном деле. Она широко используется в качестве учебного пособия студентами и аспирантами университетов, политехнических и физико-технических вузов.

В двухтомной монографии [2], переведенной и изданной в США, систематически излагаются механика и теплофизика различных многофазных сред: газовзвесей, пузырьковых жидкостей, газо- и парожидкостных потоков, двухфазных жидкостей в пористых телах. Приводятся основные уравнения механики и теплофизики многофазных сред различной структуры, рассматриваются методы описания межфазного взаимодействия в дисперсных средах, исследуются ударные и детонационные волны и волны горения в конденсированных средах, газовзвесах и пористых телах, дается теория обработки и упрочнения металлов взрывом. Излагается теория звуковых, ударных и кинематических волн и колебательных движений в двухфазных средах, гидравлика

и теплофизика газожидкостных потоков, теория кризисов теплообмена, критических истечений, фильтрации многофазных жидкостей. Описываются экспериментальные методы и их результаты. Данный двухтомник пользуется огромной популярностью у студентов и аспирантов вузов, а также исследователей, работающих в энергетике, космической и атомной технике, химической технологии, нефтяной и газовой промышленности, взрывном деле.

Деятельность Р.И. Нигматулина неразрывно связана с организацией различных конференций, симпозиумов, съездов, где он производил незабываемое впечатление своими яркими эмоциональными докладами. Научному сообществу ученых-механиков памятли последние съезды по теоретической и прикладной механике, которые успешно проходили в Казани (2015 г.), Уфе (2019 г.), Санкт-Петербурге (2023 г.) и собрали около 1500 участников каждый. Высокий уровень проведения мероприятий был оценен старшим поколением, которое вспомнило съезды, проводимые в национальных республиках СССР. Такие крупные научные мероприятия невозможны без поддержки региональных лидеров. Успех в проведении съездов в Казани и Уфе во многом обусловлен высоким авторитетом Р.И. Нигматулина в Татарстане и Башкортостане и поддержкой республиканского руководства.

Памятли международные юбилейные конференции, проведенные на судах Института океанологии им. П.П. Ширшова в 2010 и 2015 годах, которые собрали ведущих специалистов по механике многофазных сред со всего мира. Юбиляр Р.И. Нигматулин каждый день сам вел заседания. Ни один доклад не остался без комментариев председателя в присущей ему живой манере, и всегда им высказывались доброжелательные пожелания в адрес докладчика. Запомнилось одно из заседаний, которое проходило при значительной качке корабля из-за плохой погоды на Балтийском море. Некоторые участники не смогли даже присутствовать и остались в каютах. Роберт Искандерович, несмотря на неважное самочувствие и предложения отдохнуть, мужественно сам провел это заседание, не уступив место председателю.

Не забудется реформа Российской академии наук, отрыв академических институтов от РАН, что, по мнению большинства членов РАН, нанесло значительный ущерб развитию фундаментальной науки в России. Р.И. Нигматулин всегда выступал и выступает за возвращение академических учреждений в РАН, о чем свидетельствуют его многочисленные яркие выступления на общих собраниях РАН и в прессе. Тем не менее, в сложившейся сложной ситуации Р.И. Нигматулин принял активное участие в реформировании академической сети институтов в Казани и Уфе и создании на базе Казанского и Уфимского научных центров Федеральных

исследовательских центров.

Высокопродуктивную научную деятельность Р.И. Нигматулин сочетает с активной общественной, организационной и руководящей работой. Он является членом Президиума РАН, внес крупный вклад в создание и становление Тюменского научного центра СО РАН, был организатором и первым директором Института механики многофазных систем СО РАН (1990–1995 гг.), организовал кафедру и диссертационные советы в Тюменском госуниверситете. Возглавлял две академические организации в Уфе: Уфимский научный центр (1993–2006 гг.) и Академию наук Республики Башкортостан (1996–2006 гг.). С 2006 г. Р.И. Нигматулин был директором, а с 2017 г. является научным руководителем Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН — одного из крупнейших институтов РАН, сопредседателем научного совета РАН по проблемам Мирового океана. Благодаря его усилиям была кардинально улучшена работа научного флота России. Большое внимание им уделяется работе со студентами и аспирантами. Роберт Искандерович читал лекции во многих университетах СССР, России и ряде стран мира. В настоящее время работает заведующим кафедрой и профессором МГУ им. М.В. Ломоносова и Сколтеха. Является блестящим пропагандистом и популяризатором достижений отечественной науки.

Академик Р.И. Нигматулин применял свои знания и эрудицию в качестве депутата Государственного собрания РБ (избирался дважды в 1995 и в 1999 гг.), депутата Государственной Думы РФ третьего созыва (1999 г.), где возглавлял Высший экологический совет. Был представителем России в ПАСЕ. Руководил созданием важнейшего закона о регулировании работ с облученным ядерным топливом, который был принят в 2001 г.

За успешную и плодотворную деятельность Р.И. Нигматулин был награжден многими государственными наградами, среди которых Премия Ленинского комсомола (1973 г.), Государственная премия СССР (1983 г.), Премии Правительства РФ (2012, 2019 гг.), Орден Почета (2000 г.), Орден «За заслуги перед Отечеством» IV степени (2011 г.), Орден Александра Невского (2024 г.) и др.

Ученики, друзья, коллеги и редколлегия журнала сердечно поздравляют Роберта Искандеровича Нигматулина с замечательным юбилеем, желают здоровья, долголетия и новых выдающихся достижений!

Список литературы / References

- [1] Нигматулин РИ. *Основы механики гетерогенных сред*. М.: Наука. 1978. 336 с.
- [2] Нигматулин РИ. *Динамика многофазных сред*. Т. 1,2. М.: Наука; 1987. 464 с, 360 с.
Nigmatulin RI. *Dynamics of Multiphase Media*. Vol. 1,2. NY. Hemisphere; 1991. 532 p, 388 p.

Сведения об авторах / Information about the Authors**Амир Анварович Губайдуллин**

доктор физ.-мат. наук, профессор
Тюменский филиал Института теоретической и
прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Тюмень, Россия

Amir Anvarovich Gubaidullin

Sc.D. (Phys. & Math.), Prof.
Tyumen Branch of the Khristianovich Institute of Theoretical
and Applied Mechanics, Siberian Branch, Russian Academy
of Sciences, Tyumen, Russia
a.a.gubaidullin@yandex.ru
ORCID: [0000-0002-6231-6508](https://orcid.org/0000-0002-6231-6508)

Дамир Анварович Губайдуллин

доктор физ.-мат. наук, профессор
Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН,
Казань, Россия

Damir Anvarovich Gubaidullin

Sc.D. (Phys. & Math.), Prof.
Institute of Mechanics and Engineering: Kazan Science Center,
Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia
gubaidullin@imm.knc.ru
ORCID: [0000-0002-6678-1212](https://orcid.org/0000-0002-6678-1212)

Александр Алексеевич Аганин

доктор физ.-мат. наук, профессор
Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН,
Казань, Россия

Alexander Alekseevich Aganin

Sc.D. (Phys. & Math.), Prof.
Institute of Mechanics and Engineering: Kazan Science Center,
Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia
aganin54@mail.ru
ORCID: [0000-0001-7714-713X](https://orcid.org/0000-0001-7714-713X)