

## Краткий обзор авторских исследований в области динамики многофазных систем

Болотнова Р.Х.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Доклад посвящен обзору основных результатов моей научно-исследовательской деятельности.

В процессе обучения на механико-математическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности механика (с 1973 года) университетская среда предоставила возможность получать знания высочайшего уровня, которые преподавали нам выдающиеся ученые и профессора.

Обучение в университете послужило хорошим стимулом для определения привлекательного направления в моей дальнейшей научной деятельности.

После окончания МГУ в 1978 году трудовая деятельность началась в Отделе физики и математики Башкирского филиала АН СССР. Под руководством доктора физ.-мат. наук Наиля Хатыповича Ахмадеева проводились исследования динамики ударных волн в неоднородных упругопластических средах с фазовыми переходами и разрушением. Были созданы математические модели уплотняющейся пористой упругопластической среды, порошковой среды с химическими превращениями и повреждаемой среды для описания нестационарных движений ударных волн с анизотропным характером процесса динамического разрушения хрупкого и вязкого типов [1]–[6].

При изучении методов защиты объектов от откольного разрушения с помощью слоистых материалов, было предложено проведение предварительного акустического анализа. Для чего была разработана и реализована методика определения импедансов, линейных размеров слоев и их последовательности для пористых и многослойных мишеней, следующих из условия ограничения растягивающих напряжений в слоях и отсутствия наложения волн растяжения для снижения риска откольного разрушения. В результате численного моделирования ударного нагружения пластин, состоящих из 6 слоев с уменьшающимися жесткостями, подобранными так, чтобы импульсы растяжения, отраженные от контактных границ, формировались из условия отсутствия между ними временных пауз, и имели бы амплитуду, меньшую порогового уровня разрушения, удалось добиться снижения амплитуды импульса растяжения в три раза.

На базе модели уплотняющейся пористой среды решена задача ударного нагружения железной пластины с использованием тыльных пористых слоев. При прохождении импульса сжатия в тыльный пористый слой обнаружен режим непрерывного отражения в виде импульса растяжения от уплотняющейся пористой среды.

Продолжая исследования в области ударно-волновых технологий, были решены ряд задач, связанных с теоретическими основами создания новых материалов методами порошковой металлургии.

С использованием разработанной двухфазной модели порошковой среды с учетом химических превращений исследованы особенности процесса синтеза сульфида олова в результате экзотермической реакции в процессе ударно-волнового воздействия на порошковую стехиометрическую смесь олова и серы, помещенную в ампулу сохранения. В рамках акустического анализа и численного подхода показано, что в условиях выбранных опытах с жесткой ампулой сохранения, содержащей ячейку с исследуемой смесью, имеет место неоднородное нагружение смеси. В опытах при использовании мягкой ампулы сохранения происходит однородное воздействие, что является наиболее эффективным приемом в процессе ударно-волнового синтеза.

Модель повреждаемой упругопластической среды, обобщенная на двумерный случай, описывающая нестационарное движение неоднородных ударных волн с учетом анизотропии разрушения хрупкого и вязкого типов с помощью тензора повреждений, позволила исследовать особенности волновых процессов с учетом влияния краевых эффектов и двумерной кинетики на процесс динамического разрушения.

С 1999 года дальнейшая научная деятельность в Институте механики УФИЦ РАН была посвящена разработке методов построения аналитических широкодиапазонных уравнений состояния жидкости и газа. Эти исследования были связаны с задачами, поставленными академиком РАН Робертом Искандеровичем Нигматулиным, по изучению условий для достижения сверхвысоких давлений и температур в режиме коллапса паровых и газовых пузырьков в результате интенсивных акустических воздействий [7] – [12].

Под его руководством были получены уравнения состояния воды, ацетона, бензола и тетрадекана и их дейтерированных аналогов. Уравнения описывают газовую и жидкую фазы при интенсивных газогидродинамических процессах с учетом испарения и конденсации, учитывают диссоциацию и ионизацию, и которые успешно применяются различными научными коллективами при исследовании динамики ударных волн в газо-парожидкостных системах, а также для анализа состояния вещества в области суперсжатий.

Начиная с 2011 года в сотрудничестве со своими ученицами – Агишевой Ульяной Олеговной, Коробчинской Валерией Александровной и Гайнуллиной Элиной Фанилевной, успешно защитившими диссертации кандидата физ.-мат. наук, проводятся исследования, посвященные теоретическому анализу

динамических нестационарных процессов в пенных структурах и вскипающих газо- парожидкостных смесях в режимах взрывного истечения на основе разработанных двухфазных моделей газожидкостной смеси с применением новых подходов и методов численного моделирования [13] – [17]:

– Изучаются процессы взаимодействия мощного воздушного сферического ударно-волнового импульса с защитным барьером из водной пены с учетом явлений синерезиса. Исследуется динамика слабой ударной волны в водной пене на основе двухфазной упруго-вязко-пластической модели водной пены, описывающей ее поведение под воздействием ударных волн, не разрушающих пенную структуру. Важность и необходимость решения задач, касающихся применения водных пен в качестве демпфирующих преград от ударного воздействия, связаны с обеспечением эффективной безопасности в условиях чрезвычайных ситуаций.

– Рассматриваются различные режимы формирования расширяющейся струи флюида, истекающей из сосуда высокого давления через тонкое сопло, сопровождающиеся образованием вихревых зон и периодических пульсаций давления внутри струи. При формировании струи водного флюида сверхкритических параметров состояния анализируется образование всячего скачка уплотнения с образованием диска Маха. Анализ динамики таких струй необходим при решении проблем безопасности современного энергетического оборудования с целью предупреждения аварийных ситуаций.

– Исследуется эволюция вскипания струи жидкого азота в области криогенных температур и вакуумной атмосферы при различных начальных степенях перегрева, что чрезвычайно актуально при конструировании двигателей, работающих в условиях космического пространства.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность своему учителю, академику РАН Нигматулину Роберту Искандеровичу за его неоценимый вклад в мое научное развитие. Автор приносит благодарность безвременному ушедшему от нас доктору физ.-мат. наук Наилу Хатыповичу Ахмадеву, под руководством которого начиналось становление автора как профессионального исследователя.

## Список литературы

- [1]. Ахмадеев Н.Х., Болотнова Р.Х. Распространение волн напряжений в слоистых средах при ударном нагружении (акустическое приближение) // ПМТФ. 1985. № 1. С. 125–133.
- [2]. Ахмадеев Н.Х., Ахмадеев Р.Х., Болотнова Р.Х. О демпфирующих свойствах пористых прокладок при ударном сжатии и отколе // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11, № 12. С. 709–713.
- [3]. Ахмадеев Н.Х., Болотнова Р.Х. Влияние жесткости лицевого слоя на снижение растягивающих напряжений в двухслойном композите // Механика композитных материалов. 1986. № 4. С. 744–746.
- [4]. Ахмадеев Н.Х., Болотнова Р.Х. Моделирование реакции синтеза в порошковой смеси олова и серы, инициируемой ударным нагружением // Хим. физика. 1996. Т. 15, № 6. С. 102–112.
- [5]. Ахмадеев Р.Н., Болотнова Р.Х. и др. О химических превращениях в ударных волнах на примере образования сульфида олова // Журнал неорганической химии. 1998. Т. 43, № 8. С. 1299–1307.
- [6]. Динамика ударных волн в неоднородных средах с разрушением и химическими превращениями / Р.Х. Болотнова. – Москва: РУСАЙНС, 2023. –172 с.
- [7]. The theory of supercompression of vapor bubbles and nano thermonuclear fusion / Nigmatulin R., Akhatov I., Topolnikov A., Bolotnova R., et. al. // Physics of Fluids. 2005. V.17, N 10. P.107106., 31 p.
- [8]. Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния органических жидкостей на примере ацетона // Доклады РАН 2007. Т. 415, № 5. С. 617 – 621.
- [9]. Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Метод построения // ТВТ. 2008. № 2. С. 206 – 218.
- [10]. Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Результаты расчетов // ТВТ. 2008. № 3. С. 362 – 373.
- [11]. Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // ТВТ. 2011. Т. 49. № 2. С. 310–313.
- [12]. Нигматулин Р. И., Болотнова Р. Х. Широкодиапазонные уравнения состояния бензола и тетрадекана в упрощенной форме // ТВТ. 2017. Т. 55, № 2, С. 206–215.
- [13]. Агишева У.О., Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Коробчинская В.А. Особенности вихреобразования при воздействии импульса давления на газовую область, ограниченную пенным слоем // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 6. С. 47–56.
- [14]. Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Моделирование динамики ударного воздействия на водные пены с учетом вязкоупругих свойств и явлений синерезиса // Изв. РАН. МЖГ. 2020. № 5. С. 28–32.
- [15]. Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Исследование влияния диссипативных свойств водной пены на динамику ударных волн // ПМТФ. 2020. № 4. С.15–21.
- [16]. Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А. Моделирование динамики струи при истечении через тонкое сопло водного флюида, находящегося в сверхкритическом состоянии // Т и А. 2022. Т. 29, № 3. С. 361–370.
- [17]. Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., Гайнуллина Э.Ф. Моделирование процесса истечения жидкого азота через коническое сопло в вакуумную камеру // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49, № 24. С. 46–49.