



ISSN: 2658–5782

Номер 1

2025

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Обзор исследований различных режимов формирования экстремально расширяющихся струй криогенных жидкостей

Р.Х. Болотнова✉, Э.А. Файзуллина

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

E-mail: bolotnova@anrb.ru

В настоящей обзорной работе рассматриваются исследования, связанные с экспериментальным и теоретическим изучением процессов формирования экстремально расширяющихся струй криогенных жидкостей при распылении из тонкого цилиндрического канала в вакуумную камеру, обусловленных взрывным вскипанием и повышением давления за счет лавинного роста микропузырьков пара с формированием мелкодисперсных капель с большим углом раскрытия формирующейся струи. Актуальность таких исследований следует из важности проблемы защиты окружающей среды для обеспечения безопасности освоения космического пространства и направлены на достижение надежности функционирования, эффективности и снижения стоимости двигателей космических аппаратов, использующих безопасные топливные элементы, такие как комбинация жидкого кислорода и водорода или метана. Важность анализа распределения в вакуумной камере фаз флюида, диаметра, концентрации и температуры микрокапель состоит в определении оптимальных режимов, приводящих в дальнейшем к успешному воспламенению с целью интенсификации реактивной тяги ракетного двигателя. Научная новизна заключается в оригинальности предлагаемых подходов при теоретическом и численном исследовании обозначенной проблемы на основе разработки пространственных моделей многофазной газо- парожидкостной среды, основанных на законах сохранения массы, импульса и энергии каждой фазы в соответствии с одно- или двухскоростным, двухтемпературным приближениями в трехмерной постановке с учетом межфазного сопротивления, контактного теплообмена и энерго- и массообменных процессов испарения и конденсации. Для описания термодинамических свойств изучаемой криогенной жидкости важно построение широкодиапазонных уравнений состояния жидкости и пара в аналитической форме. Проведение численных исследований эволюции формы и структуры формирующейся парожидкостной вскипающей криогенной струи направлено на получение детальной информации по изучаемой проблеме и может быть использовано в виде рекомендаций при разработке малых ракетных двигателей и устройств, работающих на реактивной тяге в условиях вакуумной атмосферы и криогенных температур.

Ключевые слова: формирование расширяющихся струй криогенных жидкостей, экспериментальное, теоретическое и численное исследование

Работа выполнена в рамках государственного задания № 124030400064-2 (FMRS-2024-0001).

Review of investigations for various modes formation of extremely expanding cryogenic liquids jets

R.Kh. Bolotnova✉, E.A. Faizullina

Mavlyutov Institute of Mechanics of UFRC RAS

E-mail: bolotnova@anrb.ru

The review considers of investigations related to the experimental and theoretical study of formation an extremely expanding jets of cryogenic liquids when sprayed from a thin cylindrical channel into a vacuum chamber, caused by explosive boiling and pressure increase due to the avalanche growth of vapor microbubbles with the formation of fine droplets with a large opening jet angle. The relevance of such research follows from the importance of environmental protection for the safety of space exploration and is aimed at achieving reliable operation, efficiency and cost reduction of spacecraft engines using safe fuel cells such as a combination of liquid oxygen and hydrogen or methane. The importance of analyzing the distribution of fluid phases in a vacuum chamber, the diameter, concentration, and temperature of microdroplets is to determine the optimal modes that lead to successful ignition in order to intensify the rocket engine's thrust. The scientific newness lies in the originality of the proposed approaches in the theoretical and numerical study of the designated problem based on the development of spatial models of a multiphase gas-vapor-liquid medium based on the laws of conservation of mass, momentum and energy of each phase in accordance with one- or two speeds and with two-temperature approach in a three-dimensional formulation, taking into

account interfacial resistance, contact heat exchange and energy and mass exchange processes of evaporation and condensation. To describe the thermodynamic properties of the cryogenic liquid under study, it is important to construct wide-range equations of state of liquid and vapor in an analytical form. Numerical studies of the evolution of the shape and structure of an emerging vapor-liquid boiling cryogenic jet are aimed at obtaining detailed information on the problem under study and can be used as recommendations for the development of small rocket engines and devices powered by reactive thrust in a vacuum atmosphere and cryogenic temperatures.

Keywords: formation of expanding jets of cryogenic liquids, experimental, theoretical and numerical studies

1. Технологии формирования струйных течений

Разработка технологий криогенных двигателей для ракетно-космических орбитальных маневровых систем и малоразмерных (микро-, нано-, пико-) спутников связана с возрастающим спросом на услуги космической связи, вещания, передачи данных, навигации, мониторинга Земли и атмосферы в режиме реального времени. Вопросы безопасности в области космического движения имеют место при выборе топливных элементов для двигателей спутниковых ракет, в связи с этим возникает необходимость замены типичных токсичных топливных элементов на безопасные аналоги, такие как комбинация жидкого кислорода и водорода или метана.

Принцип работы криогенных двигателей, работающих в космическом вакууме, состоит из нескольких стадий. Изначально криогенное жидкое топливо впрыскивается через тонкий канал в реакционную камеру, и запускается процесс распыления как результат внезапного вскипания, инициируемый резким падением давления, что вызывает зарождение микроскопических пузырьков пара, которые растут в перегретой жидкости с дальнейшим формированием газокапельной мелкодисперсной смеси, что приводит к повышению давления внутри камеры сгорания до достижения равновесного давления незадолго до воспламенения, а затем через сопло происходит выброс продуктов сгорания и формирование экстремально расширяющейся струи и ее распыление, приводящее к реактивной тяге.

Малоразмерные ракетные двигатели ориентации на спутниках, не создающие большой тяги, иногда не требуют топлива: здесь достаточно газообразного азота, подаваемого под давлением из резервуара через сопло. Для исследования обозначенных проблем в работах [1,2] (Rees et al., 2019) на испытательном стенде проводились экспериментальные исследования перегретых криогенных жидкостей на примере азота, в которых с помощью высокоскоростной теневой графики были определены картины и углы распыления и получена зависимость скоростей и диаметров капель от условий впрыска. Дальнейшее экспериментальное изучение внезапного вскипания жидкого азота было продолжено в исследованиях [3] (Rees et al., 2020). Экспериментальные данные [1–3] (Rees et al., 2019), (Rees et al., 2020) обеспечивают всеобъемлющую базу данных для проверки численных моделей и дальнейших численных исследований.

Численное моделирование и исследование процесса формирования экстремально расширяющейся струи

жидкого азота в вакуумном пространстве при ее распылении из тонкого цилиндрического канала, сопровождающегося взрывным повышением давления в реакционной камере за счет лавинного роста микропузырьков пара в перегретом жидком состоянии, проводится на основе многофазных моделей газо-парожидкостных смесей, учитывающих неравновесные процессы испарения и конденсации [4–8] с привлечением современных методов численной реализации создаваемой модели, а именно, разработки новых решателей в среде программного комплекса OpenFOAM с возможностью моделирования многомасштабных временных процессов внезапного вскипания и распыления криогенной жидкости и формирования экстремально расширяющегося струйного течения в вакуумной камере, что представляет собой важную научную проблему, связанную с вопросами разработки технологий эксплуатации и безопасности криогенных двигателей для ракетно-космических орбитальных маневровых систем и малоразмерных спутников.

2. Актуальность обозначенной проблемы

В связи с настоящими и будущими проблемами защиты окружающей среды и безопасности освоения космического пространства весьма актуальны теоретические исследования, направленные на обеспечение безопасности функционирования, надежности, эффективности и снижения стоимости двигателей космических аппаратов с использованием топливных элементов, состоящих из смеси безопасных криогенных жидких топлив.

Впрыск такого рода криогенных жидкостей в вакуумную атмосферу космоса приводит к перегретому состоянию, которое сопровождается спонтанным распылением из-за взрывного вскипания и достижением больших скоростей истечения струи перегретой жидкости с высокой степенью перегрева, которая распыляется в камере сгорания из-за испарения и производит мелкодисперсное распыление с большим углом раскрытия и небольшими каплями. Исследование распределения в камере сгорания фаз флюида, диаметра, концентрации и температуры микрокапель направлено на определение параметров для последующего успешного воспламенения и минимизации разрушительных скачков давления с целью интенсификации реактивной тяги ракетного двигателя.

Сложность и высокая стоимость проведения экспериментальных исследований в диапазоне криогенных температур и вакуумной атмосферы ограничивает

получение экспериментальных данных о криогенном внезапном вскипании, что стимулирует развитие альтернативы численных подходов в этом направлении.

При компьютерной реализации исследуемой проблемы применяются методы численного моделирования высокой точности и скорости сходимости, основанные на современных средствах, таких как программные продукты ANSYS, пакет вычислительной гидродинамики OpenFOAM, среда разработки программного обеспечения Lazarus и графические редакторы GIMP и ParaView.

Тестирование полученных результатов проводится путем сравнения с аналитическими решениями и экспериментальными литературными данными [1–3] (Rees et al., 2019), (Rees et al., 2020) по взрывному вскипанию перегретой криогенной жидкости на примере азота с формированием струи в камере, поддерживающей давление близкое к вакууму.

Предлагаемые для решения рассматриваемой научной проблемы подходы особенно важны и актуальны, так как позволяют получить рекомендации при разработке малых ракетных двигателей и устройств, работающих на реактивной тяге в условиях вакуумной атмосферы и криогенных температур.

3. Современное состояние исследований

Исследование процесса внезапного вскипания и истечения газо-паронасыщенных жидкостей из труб и сопел находит широкое применение в различных технологических процессах современной энергетики, нефтегазовой промышленности, а также в ракетной технике. Анализ динамики струй вскипающих жидкостей необходим при разработке и создании различных устройств, инициирующих процессы для разных режимов распыления жидкости. В процессе внезапного вскипания жидкость, находящаяся под высоким давлением, впрыскивается в среду через тонкое короткое сопло, где давление ниже давления насыщения жидкости. В таких условиях жидкость испытывает внезапное изменение фазы, вызванное спонтанным зарождением большого количества микроскопических пузырьков пара, которые быстро растут и сливаются, что приводит к широкому разбрызгиванию очень мелких капель.

Использование жидкого азота в качестве рабочей жидкости широко применяется во многих областях, требующих охлаждения методом распыления при криогенной температуре (криогенные аэродинамические трубы, охлаждение сверхпроводящих магнитов: [9] (Xiufang Liu et al., 2017). Методики распыления жидкого азота применяются в медицине при криоабляции с высокоточным контролем скорости и температуры в системе [10] (Prashant Srivastava et al., 2020).

Экспериментальные исследования по динамике истечения вскипающей жидкости рассмотрены в работе [11] (Edwards A.R., O'Brien T.P., 1970).

В экспериментах по взрывному вскипанию струй перегретой воды авторов Решетникова А.В., Мажейко Н.А. и др. (2007) [12], Алексеева М.В.,

Лежнина С.И. и др. (2014) [13] определены различные стадии формирования струи в зависимости от начального значения перегрева струи. В последнее время внимание исследователей привлекает использование пузырьковой структуры двухфазного потока для распыливания жидкостей с использованием высокого давления [14, 15] (Weaver D.S. et al., 2015; Решетников А.В. и др., 2016).

В работе [16] (Решетников А.В., Бусов К.А., Мажейко Н.А. и др., 2012) проведены экспериментальные исследования струй вскипающей перегретой воды для тонких цилиндрических каналов $d = 0.5$ мм в зависимости от начальных состояний жидкости близких к термодинамической критической точке, с формированием режимов истечения с углом распыла струи от конической формы до ее полного «развала». Установлена связь между формами струй перегретой воды с механизмами зародышеобразования и показано, что с увеличением исходной температуры струя приобретает форму полого конуса с растущим углом раствора при вершине.

В работе Ширшова Я.Н., Нересесян Д.А. и др. (2016) [17] теневым методом были получены видеок кадры процесса развития водяной струи при истечении из сопла при исходном давлении 400 МПа.

В монографии [18] (Костюк В.В., Фирсов В.П., 2015) рассматривались фундаментальные проблемы использования криогенных технологий в сложных технических системах, в том числе экспериментальные исследования процессов теплообмена при запуске криогенных двигательных установок с использованием струйных систем.

В работах [19, 20] (Reitz, 1990; Simões-Moreira et al., 2002) экспериментально исследовались процессы внезапного вскипания с использованием жидких углеводородов, этанола и хладагентов. Было обнаружено, что не только степень перегрева определяет интенсивность взрывного вскипания, но и условия впрыска. С помощью теневой графики было визуализировано оставшееся жидкое ядро в брызгах внезапного вскипания и распад струи [19, 20] (Reitz, 1990; Simões-Moreira et al., 2002).

В отличие от обычных жидкостей взрывное вскипание криогенных жидкостей гораздо менее исследовано из-за значительно более жестких условий эксперимента. В рамках экспериментального исследования о лазерном зажигании в модельной камере сгорания ракеты в условиях большой высоты наблюдалось внезапное вскипание струи жидкого кислорода [21] (De Rosa et al., 2006). На том же испытательном стенде было исследовано внезапное вскипание струй жидкого кислорода, которое было сопоставлено со вскипающими спреями обычных жидкостей [22] (Lamanna et al., 2015). Показано, что спреи жидкого кислорода и обычных жидкостей имеют сходную морфологию.

В [9] (Xiufang Liu et al., 2017) при распылении жидкого азота исследовалось влияние разницы давлений впрыска на распределение капель по размерам. Измерения показали, что увеличение разницы давлений впрыска улучшает распыление, о чем свидетельствуют гомо-

генизация и уменьшение размера капель.

В работах [1, 2] (Rees et al., 2019) был расширен диапазон допустимости переходных корреляций, полученный в [23] (Cleary et al., 2007) для криогенного жидкого азота и показана асимптотическая эволюция угла распыления с увеличением перегрева. В этом же исследовании серия экспериментов показала уменьшение диаметра капель с увеличением температуры впрыска в полностью вскипающих спреях жидкого азота и глобальный минимум в профиле вертикальной скорости в зависимости от температуры впрыска. В дальнейших исследованиях [1–3] (Rees et al., 2019, 2020) были измерены распределения скорости и диаметра капель сильно перегретых вскипающих брызг жидкого азота с постоянными условиями впрыска.

Теоретические исследования, посвященные вопросам критического истечения жидкости в пузырьковом режиме, проводились в работах Нигматулина Р.И. (1987) [4], Нигматулина Б.И., Сопленкова К.И. (1980) [5], Губайдуллина А.А. (2006) [6], Ивашнева О.Е. (2009) [7], Шагапова В.Ш. (2012) [8] и др.

Для описания свойств жидкости и пара разработаны термодинамически согласованные реалистические широкодиапазонные в аналитической форме уравнения состояния воды, ацетона, бензола и тетрадекана, описывающие состояния в областях насыщения, критической точки, достоверность которых подтверждена согласованием с экспериментальными данными по ударной и изотермической сжимаемостям, критическим параметрам и теоретическим приближениям в областях высоких и низких давлений. Методика, используемая при построении таких уравнений состояния, в том числе позволяет учитывать межфазный энерго- и массообмен в исследуемом процессе [24, 25] (Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х., 2011, 2017).

Численная реализация одномерных и пространственных моделей проводилась с использованием методов подвижных лагранжевых сеток и сквозного счета. Апробация разработанных моделей осуществлена с помощью компьютерного моделирования задач по взрывному истечению паро-газожидкостной смеси из камеры высокого давления в одно- и двумерном приближениях и проведено сравнение расчетов с экспериментальными данными.

В работе [26] (Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., 2017) на основе модели вскипания, предложенной в [27] (Болотнова Р.Х., Бузина В.А. (Коробчинская В.А.), Галимзянов М.Н., Шагапов В.Ш., 2012), проведен анализ влияния исходного состояния воды в камере высокого давления и интенсивности зародышеобразования вскипающей воды на эволюцию формы пароводяной струи на начальной стадии истечения с диаметром сопла $d = 0.5$ мм для условий экспериментов [16] (Решетников А.В., Бусов К.А., Мажейко Н.А. и др., 2012). Для исследования процесса формирования поллой струи при истечении из тонкого сопла водяного пара, изначально находящегося при высоком давлении в сверхкритическом состоянии, численное моделирование прове-

дено с применением решателя sonicFoam библиотеки открытого пакета OpenFOAM в двумерной осесимметричной постановке [28] (Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., 2018). В этой работе исследовался процесс формирования поллой струи при истечении из тонкого сопла из сверхкритического состояния, чему способствовало образование внутренней границы струи (диска Маха) и развитие внешнего и внутреннего тороидальных вихрей. Достоверность результатов оценена сравнением расчетов, полученных по динамике волны разгрузки, распространяющейся в области высокого давления, с применением пакета OpenFOAM, с уравнением состояния Пенга–Робинсона и численным решением аналогичной задачи методом сквозного счета в случае одномерного плоского приближения с уравнением состояния совершенного газа. Проведено численное исследование сверхкритических режимов струйного истечения вскипающей воды через тонкое сопло с использованием модифицированного решателя программного комплекса OpenFOAM. Изучен процесс образования вихревых зон, их влияние на структуру струи и на формирование перед струей акустических волновых импульсов периодической структуры [29] (Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Коробчинская В.А., Файзуллина Э.А., 2020), [30] (Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A., Faizullina E.A., 2021), [31] (Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., 2022).

Исследование нестационарного процесса истечения вскипающего теплоносителя, вызванного торцевым разрывом трубопровода, проведено в [32, 33] (Алексеев М.В., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А. и др., 2014, 2017) на основе неравновесной гомогенной (2014) и релаксационной (2017) моделей, где обнаружено формирование периодических вихреобразных структур.

В исследовании Lamanna et al. (2015) [22] для режимов вскипания была разработана модель для прогнозирования угла распыления в области вблизи сопла по степени перегрева и поверхностному натяжению. На микроскопическом уровне динамика роста пузырьков хорошо документирована в литературе с использованием теоретических и численных методов и проверки этих методов экспериментами (Lee and Merte, 1996 [34]; Robinson and Judd, 2004 [35]; Sher et al., 2008 [36]; Prosperetti, 2017 [37]). На макроуровне многочисленные исследования показывают крупномасштабные характеристики, такие как плотность распыления, угол распыления и проникновение (Lee J., 2009 [38], Navarro-Martinez S., 2014 [39], Karathanassis I.K., 2017 [40], Gärtner J.W., 2019 [41], 2020 [42], Calay R., Holdo A., 2008 [43]). В работе [44] (Loureiro D.D. et al., 2020) предпринята попытка преодолеть разрыв между малым и большим масштабами. В этой работе метод прямого численного моделирования используется для исследования первичных процессов распада, происходящих в микроскопических масштабах, связанных с распылением при внезапном кипении для условий, характерных при впрыске жидкого кислорода в камеру сгорания низкого давления ракетного двигателя в космосе.

Из-за очень сложных экспериментальных условий, касающихся криогеники, а также вакуумной атмосферы на больших высотах, до сих пор существует мало экспериментальных данных о криогенном внезапном вскипании. Ограничения и затраты, связанные с экспериментальными исследованиями криогенных топлив, делают привлекательными альтернативы численных подходов при реализации рассматриваемых проблем.

В результате дальнейших исследований на основе ранее разработанного метода построения уравнения состояния для жидкости и пара получено термодинамически согласованное аналитическое уравнение состояния для жидкого и газообразного азота молекулярной фазы. При построении уравнения состояния использована форма Ми–Грюнайзена в виде суммы упругой и тепловой составляющих для давления и внутренней энергии. Упругие составляющие описаны потенциалом типа Борна–Майера. Для тепловых составляющих принято упрощающее приближение, следующее из условия постоянства средней теплоемкости и зависимости функции Грюнайзена от объема. При определении уравнения состояния паровой и жидкой фаз азота использовались таблицы [45] (Сычев В.В. и др., 1977), рассчитанные на основе уравнений, аппроксимирующих экспериментальные данные по изотермической сжимаемости, адиабатической скорости звука, включая критическую область и линию равновесия фаз. Полученное уравнение состояния азота позволяет исследовать явления, связанные с процессами испарения и конденсации азота, при моделировании многофазных течений с учетом межфазного тепло-массообмена в условиях низких давлений и криогенных температур (Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F., Korobchinskaya V.A., 2023 [46]; Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Файзуллина Э.А., 2024 [47]).

Рассмотрены неравновесные массообменные процессы испарения и конденсации с учетом контактного теплообмена, возникающие при вскипании струи жидкого азота при ее истечении из тонкого сопла в вакуумную атмосферу. Для описания рассматриваемых процессов используется трехмерная осесимметричная двухфазная модель парожидкостной смеси в односкоростном, однодавленческом, двухтемпературном приближении с учетом межфазного теплообмена и неравновесных массообменных процессов. Приведены оценки точности разработанного численного метода, реализующего предложенную модель на основе программного обеспечения OpenFOAM, и достоверности полученных результатов в сравнении с экспериментальными данными. Проведенные численные исследования показали формирование области пузырькового течения в ближней зоне на выходе из сопла. Показано, что по мере удаления от сопла струя переходит в парокапельный режим течения, доминирующий над пузырьковым в процессе развития струи. Проанализировано влияние степени перегрева на угол распыления струи, образование и развитие вихревых зон в процессе перехода из пузырькового режима истечения в парокапельный с оценкой уровня монодисперсности парокапельного по-

тока. При изучении динамики полей температур выявлено, что более высокая температура жидкой фазы азота в сравнении с паровой фазой определяет условия для продолжения процесса испарения [48] (Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A., Gainullina E.F., 2023).

Проведено численное моделирование нестационарного процесса истечения жидкого азота через коническое сопло при разгерметизации камеры высокого давления. Для описания процесса принята двухфазная пространственная осесимметричная модель парожидкостной смеси в двухтемпературном, однодавленческом, двухскоростном приближении, учитывающая неравновесные процессы испарения и конденсации. Интенсивность фазового перехода определяется в зависимости от числа и радиуса пузырьков, степени перегрева по температуре, теплоты парообразования, коэффициента теплопроводности и чисел Нуссельта и Якоба. Исследована эволюция вскипания струи жидкого азота в области криогенных температур в зависимости от различных начальных условий. Проанализировано влияние степени перегрева на угол распыления струи. Численная реализация предложенной модели осуществлена с помощью созданного авторами решателя в среде OpenFOAM. Получены расчетные распределения скоростей для двух степеней перегрева, аналогичных экспериментам [1–3] (Rees et al., 2019, 2020). В расчетах установлено, что увеличение степени перегрева приводит к увеличению угла распыления струи и возрастанию скоростей в основном струйном потоке. Проведен сравнительный анализ численных расчетов с представленными в [1–3] экспериментальными точками по значениям массовых скоростей, углов раскрытия струи и фотографиями моделируемых экспериментов. Полученные численные расчеты имеют удовлетворительное согласование с экспериментальными данными (Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., Гайнуллина Э.Ф., 2023 [49]; Коробчинская В.А., 2024 [50]).

Дальнейшие исследования процесса истечения жидкого азота из сосуда высокого давления в вакуумную камеру проводились для условий формирования поля скоростей струйного потока при высоких степенях перегрева по давлению. Полученные в [51] (Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., Гайнуллина Э.Ф., 2024) результаты удовлетворительно согласуются с экспериментами [1–3] (Rees et al., 2019, 2020).

4. Заключение

В обзоре проведен анализ экспериментальных и теоретических работ, связанных с изучением динамики формирования струйных потоков при истечении через сопло криогенных жидкостей из камеры высокого давления в вакуумную атмосферу, вследствие лавинного роста числа микропузырьков пара и формирования струй с различными диапазонами углов раскрытия, в зависимости от конструкции экспериментальной установки, начальных условий, степени перегрева рабочей жидкости и ее теплофизических свойств. Важность результатов рассмотренных исследований обусловлена возмож-

ностью их применения при усовершенствовании технологических процессов, сопровождающихся внезапным вскипанием и истечением газо-паронасыщенных жидкостей из каналов и труб, используемых во многих областях современной энергетики, нефтегазовой промышленности, медицине, а также в ракетной технике, в которых применяются методы распыления в условиях криогенных температур. В частности, использование жидкого азота в качестве рабочей жидкости необходимо при исследовании газодинамических процессов в криогенных аэродинамических трубах, для охлаждения сверхпроводящих магнитов, при распылении жидкого азота в медицинской практике для криоабляции с высокоточным контролем скорости и температуры.

Список литературы / References

- [1] Rees A., Araneo L., Salzmann H., Kurudzija E., Suslov D., Lamanna G., Sender J., Oswald M. Investigation of velocity and droplet size distributions of flash boiling LN₂-Jets with phase doppler anemometry // In: 29th ILASS-Europe Conference, 2019. Paris, France. 8 p.
https://elib.dlr.de/132832/1/Rees_ILASS2019.pdf
- [2] Rees A., Salzmann H., Sender J., Oswald M. Investigation of flashing LN₂-Jets in terms of spray morphology, droplet size and velocity distributions // In: 8th EUCASS Conference, 2019. Madrid, Spain. Pp. 1–13.
[DOI: 10.13009/EUCASS2019-418](https://doi.org/10.13009/EUCASS2019-418)
- [3] Rees A., Araneo L., Salzmann H., Lamanna G., Sender J., Oswald M. Droplet velocity and diameter distributions in flash boiling liquid nitrogen jets by means of phase doppler diagnostics // Experiments in Fluids Volume. 2020. V. 61, No. 182. 18 p.
[DOI: 10.1007/s00348-020-03020-7](https://doi.org/10.1007/s00348-020-03020-7)
- [4] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред // М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с., Ч. 2. 360 с.
Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media. Vol.1, 2. Hemisphere, N.Y. 1990.
- [5] Нигматулин Б.И., Сопленков К.И. Исследование нестационарного истечения вскипающей жидкости из каналов в термодинамически неравновесном приближении // Теплофизика высоких температур. 1980. Т. 18, № 1. С. 118–131.
Nigmatulin B.I., Soplenikov K.I. Unsteady-state outflow of a boiling liquid from channels in a thermodynamically nonequilibrium approximation // High Temperature. 1980. V. 18, No. 1. Pp. 118–131 (in Russian).
[MathNet: tv10023](https://mathnet.ru/tvt10023)
- [6] Губайдуллин А.А. Введение в волновую динамику газожидкостных сред // ТюмГНГУ, 2006. 86 с.
Gubaidullin A.A. Introduction to the wave dynamics of gas-liquid media // TSU, 2006. 86 p. (in Russian).
- [7] Ивашнев О.Е. Самоподдерживающиеся ударные волны в неравновесно кипящей жидкости: Автореф. дис. доктора физ.-мат. наук: 01.02.05. М., 2009. 40 с.
Ivashnev O.E. Self-sustaining shock waves in nonequilibrium boiling liquid: abstract of thesis. dis. Doctor of Physics and Mathematics Sciences: 01.02.05. M., 2009. 40 p. (in Russian)
<http://mech.math.msu.su/~snark/files/vak/arkO.pdf>
- [8] Шагапов В.Ш., Ялаев А.В. Объемное вскипание жидкости, содержащей газовые зародыши // Теоретические основы химической технологии. 2012. Т. 46, № 4. С. 420–431.
Shagapov V.Sh., Yalaev A.V. Volumetric boiling of a liquid containing gas nuclei // Theoretical Foundations of Chemical Technology. 2012. V. 46, No. 4. Pp. 420–431 (in Russian).
[EDN: ozlcyx](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.01.011)
- [9] Xiufang Liu, Rong Xue, Yixiao Ruan, Liang Chen, Xingqun Zhang, Yu Hou. Effects of injection pressure difference on droplet size distribution and spray cone angle in spray cooling of liquid nitrogen // Cryogenics. 2017. No. 83. Pp. 57–63.
[DOI: 10.1016/j.cryogenics.2017.01.011](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.01.011)
- [10] Prashant Srivastava, Amitesh Kumar. Characterization of performance of multihole nozzle in cryospray // Cryobiology. 2020. No. 96. Pp. 197–206.
[DOI: 10.1016/j.cryobiol.2020.06.008](https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2020.06.008)
- [11] Edwards A.R., O'Brien T.P. Studies of phenomena connected with the depressurization of water reactors // Journal of the British Nuclear Energy Society. 1970. V. 9, No. 2. Pp. 125–135.
<https://senior.app.box.com/BNES-VOL9-2>
- [12] Решетников А.В., Мажейко Н.А., Беглецов В.Н., и др. Динамика пульсаций при взрывном вскипании струй перегретой жидкости // Письма в журнал технической физики. 2007. Т. 33, № 17. С. 31–37.
[EDN: rcuvfj](https://doi.org/10.1134/S1063785007090052)
Reshetnikov A.V., Mazheyko N.A., Begletsov V.N., et al. Pulsation dynamics during explosive boil-up of overheated water jets // Technical Physics Letters. 2007. V. 33, No. 9. Pp. 732–734.
[DOI: 10.1134/S1063785007090052](https://doi.org/10.1134/S1063785007090052)
- [13] Алексеев М.В., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А., Сорокин А.Л. Генерация ударно-волновых и вихревых структур при истечении струи вскипающей воды // Теплофизика и аэромеханика. 2014. № 6. С. 795–798.
[EDN: taojtx](https://doi.org/10.1134/S0869864314060122)
Alekseev M.V., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A., Sorokin A.L. Generation of shockwave and vortex structures at the outflow of a boiling water jet // Thermophysics and Aeromechanics. 2014. V. 21, No. 6. Pp. 763–766.
[DOI: 10.1134/S0869864314060122](https://doi.org/10.1134/S0869864314060122)
- [14] Weaver D.S. et al. Loading of steam generator tubes during main steam line breaks // Ottawa, Canada. 2015. 171 p.
- [15] Лепешинский И.А., Решетников В.А., Антоновский И.В. и др. Смесь с двухфазным рабочим телом // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Москва: МАИ, 2016. С. 93–95.
Lepeshinsky I.A., Reshetnikov V.A., Antonovsky I.V., et al. A mixer with a two-phase working fluid // Proceedings of the XI International Conference on Nonequilibrium Processes in Nozzles and Jets. Moscow: MAI, 2016. Pp. 93–95 (in Russian).
[EDN: uuvcaj](https://doi.org/10.1134/S0869864312020151)
- [16] Решетников А.В., Бусов К.А., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П. Переходные режимы вскипания струй перегретой воды // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 3. С. 359–367.
[EDN: piggdv](https://doi.org/10.1134/S0869864312020151)
Reshetnikov A.V., Busov K.A., Mazheyko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Transient behavior of superheated water jets boiling // Thermophysics and Aeromechanics. 2012. V. 19, No. 2. Pp. 329–336.
[DOI: 10.1134/S0869864312020151](https://doi.org/10.1134/S0869864312020151)
- [17] Ширшов Я.Н., Нерсесян Д.А., Сысоев Н.Н., Иванов И.Э., Знаменская И.А. Оптические исследования динамики развития водяной струи высокого давления // Матер. XI Международ. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях. М.: МАИ, 2016. С. 196–198.
Shirshov Ya.N., Nersesyan D.A., Sysoev N.N., Ivanov I.E., Znamenskaya I.A., Optical study for dynamics of high-pressure water jet // Proc. XI Int. Conf. for Inequilibrium Processes in Nozzles and Jets, MAI, Moscow. 2016. Pp. 196–198 (in Russian).
[EDN: xcxlwn](https://doi.org/10.1134/S0869864312020151)
- [18] Костюк В.В., Фирсов В.П. Теплообмен и гидродинамика в криогенных двигательных установках // Москва: Наука, 2015. 319 с.
Kostyuk V.V., Firsov V.P. Heat transfer and hydrodynamics in cryogenic propulsion systems. Moscow : Nauka Publ., 2015. 319 p. (in Russian).
- [19] Reitz R.D. A photographic study of flash-boiling atomization // Aerosol Science and Technology. 1990. V. 12, No. 3. Pp. 561–569.
[DOI: 10.1080/02786829008959370](https://doi.org/10.1080/02786829008959370)
- [20] Simões-Moreira J.R., Vieira M.M., Angelo E. Highly expanded flashing liquid jets // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2002. V. 16, No. 3. Pp. 415–424.
[DOI: 10.2514/2.6695](https://doi.org/10.2514/2.6695)
- [21] De Rosa M., Sender J., Zimmermann H., Oswald M. Cryogenic spray ignition at high altitude conditions // In 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE JPC. Sacramento, California. July. 2006.
[DOI: 10.2514/6.2006-4539](https://doi.org/10.2514/6.2006-4539)
- [22] Lamanna G., Kamoun H., Weigand B., Manfletti C., Rees A., Sender J., Oswald M. and Steelant J. Flashing behavior of rocket engine propellants // Atomization and Sprays. 2015. V. 25, No. 10. Pp. 837–856.
[DOI: 10.1615/AtomizSpr.2015010398](https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2015010398)

- [23] Cleary V., Bowen P. and Witlox H. Flashing liquid jets and two-phase droplet dispersion: I. Experiments for derivation of droplet atomisation correlations // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. V. 142, No. 3. Pp. 786–796.
DOI: [10.1016/j.jhazmat.2006.06.125](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.125)
- [24] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // *Теплофизика высоких температур*. 2011. Т. 49, № 2. С. 310–313.
EDN: nefzrf
Nigmatulin R.I., Bolotnova R.Kh. Wide-range equation of state for water and steam: Simplified form // *High Temperature*. 2011. V. 49, No. 2. P. 303–306.
DOI: [10.1134/S0018151X11020106](https://doi.org/10.1134/S0018151X11020106)
- [25] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонные уравнения состояния бензола и тетрадекана в упрощенной форме // *Теплофизика высоких температур*. 2017. Т. 55, № 2. С. 206–215.
DOI: [10.7868/S004036441701015X](https://doi.org/10.7868/S004036441701015X)
Nigmatulin R.I., Bolotnova R.Kh. Simplified wide-range equations of state for benzene and tetradecane // *High Temperature*. 2017. V. 55, No. 2, Pp. 199–208.
DOI: [10.1134/S0018151X17010151](https://doi.org/10.1134/S0018151X17010151)
- [26] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А. Пространственное моделирование процесса формирования струи вскипающей воды при истечении из тонкого сопла // *Теплофизика и аэромеханика*. 2017. Т. 24, № 5. С. 783–794.
EDN: zmwkff
Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A. Boiling water jet outflow from a thin nozzle: spatial modeling // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017. V. 24, No. 5. Pp. 761–772.
DOI: [10.1134/S0869864317050110](https://doi.org/10.1134/S0869864317050110)
- [27] Болотнова Р.Х., Бузина В.А. (Коробчинская В.А.), Галимзянов М.Н., Шагапов В.Ш. Гидродинамические особенности процессов истечения вскипающей жидкости // *Теплофизика и аэромеханика*. 2012. № 6. С. 719–730.
Bolotnova R.H., Buzina V.A. (Korobchinskaya V.A.), Galimzyanov M.N., Shagapov V.Sh. Hydrodynamic features of boiling liquid outflow processes // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2012. No. 6. Pp. 719–730 (in Russian).
EDN: pigavj
- [28] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Особенности формирования полой струи водяного пара сверхкритических параметров состояния, истекающего через тонкое сопло // *Теплофизика и Аэромеханика*. 2018. Т. 25, № 5. С. 783–789.
EDN: yursot
Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Supercritical steam out-flow through a thin nozzle: forming a hollow jet // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018. V. 25. No. 5. Pp. 751–757.
DOI: [10.1134/S0869864318050116](https://doi.org/10.1134/S0869864318050116)
- [29] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Коробчинская В.А., Файзуллина Э.А. Моделирование пространственных динамических процессов в водных пенах и вскипающих струях // Уфимская осенняя математическая школа. 2020. Т. 2. С. 180–182.
Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F., Korobchinskaya V.A., Fayzullina E.A. Modeling of spatial dynamic processes in water foams and boiling jets // *Ufa Autumn Mathematical School*. 2020. V. 2. Pp. 180–182 (in Russian).
EDN: xuffya
- [30] Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A., Faizullina E.A. Analysis the dynamic formation of a vapor supersonic jet under outflow from thin nozzle // *Journal of Physics: Conference Series* 2021. V. 2103. 012219.
DOI: [10.1088/1742-6596/2103/1/012219](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012219)
- [31] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А. Моделирование динамики струи при истечении через тонкое сопло водного флюида, находящегося в сверхкритическом состоянии // *Теплофизика и Аэромеханика*. 2022. Т. 29, № 3. С. 361–370.
EDN: ppyouf
Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A. Modeling the dynamics of supercritical water jet from a thin nozzle // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2022. V. 29, No. 3. Pp. 347–355.
DOI: [10.1134/S0869864322030039](https://doi.org/10.1134/S0869864322030039)
- [32] Алексеев М.В., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А., Сорокин А.Л. Генерация ударноволновых и вихревых структур при истечении струи вскипающей воды // *Теплофизика и аэромеханика*. 2014. Т. 21, № 6. С. 795–798.
EDN: taojtx
Alekseev M.V., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A., Sorokin A.L. Generation of shock wave and vortex structures at the outflow of a boiling water jet // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014. V. 21, No. 6. Pp. 763–766.
DOI: [10.1134/S0869864314060122](https://doi.org/10.1134/S0869864314060122)
- [33] Алексеев М.В., Вожаков И.С., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А. Волновые процессы при истечении водяного теплоносителя со сверхкритическими начальными параметрами // *Теплофизика и аэромеханика*. 2017. Т. 24, № 5. С. 821–824.
EDN: zmwkgt
Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A. Wave processes at outflow of water coolant with initial supercritical parameters // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017. V. 24, No. 5. Pp. 799–802.
DOI: [10.1134/S0869864317050158](https://doi.org/10.1134/S0869864317050158)
- [34] Lee H.S., Merte H. Spherical vapor bubble growth in uniformly superheated liquids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1996. V. 39, No. 12. Pp. 2427–2447.
DOI: [10.1016/0017-9310\(95\)00342-8](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00342-8)
- [35] Robinson A., Judd R. The dynamics of spherical bubble growth // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. V. 47, No. 23. Pp. 5101–5113.
DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.05.023](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.05.023)
- [36] Sher E., Bar-Kohany T., Rashkovan A. Flash-boiling atomization // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. V. 34, No. 4. Pp. 417–439.
DOI: [10.1016/j.peccs.2007.05.001](https://doi.org/10.1016/j.peccs.2007.05.001)
- [37] Prosperetti A. Vapor bubbles // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2017. V. 49, Pp. 221–248.
DOI: [10.1146/annurev-fluid-010816-060221](https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010816-060221)
- [38] Lee J., Madabhushi R., Fotache C., Gopalakrishnan S., Schmidt D. Flashing flow of superheated jet fuel // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2009. V. 32, No. 2. Pp. 3215–3222.
DOI: [10.1016/j.proci.2008.06.153](https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.153)
- [39] Navarro-Martinez S. Large eddy simulation of spray atomization with a probability density function method // *International Journal of Multiphase Flow*. 2014. V. 63. Pp. 11–22.
DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.02.013](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.02.013)
- [40] Karathanassis I.K., Koukouvinis P., Gavaises M. Comparative evaluation of phase-change mechanisms for the prediction of flashing flows // *International Journal of Multiphase Flow*. 2017. V. 95. Pp. 257–270.
DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.06.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.06.006)
- [41] Gärtner J.W., Rees A., Kronenburg A., Sender J., Oswald M., Loureiro D. Large eddy simulation of flashing cryogenic liquid with a compressible volume of fluid solver // *ILASS-Europe 2019, 29th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2–4 September 2019, Paris, France*. 8 p.
<https://elib.dlr.de/132833/1/ILASS%202019%20Large%20Eddy%20Rees.pdf>
- [42] Gärtner J.W., Kronenburg A., Rees A., Sender J., Oswald M., Lamanna G. Numerical and experimental analysis of flashing cryogenic nitrogen // *International Journal of Multiphase Flow*. 2020. V. 130. 103360.
DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103360](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103360)
- [43] Calay R., Holdo A. Modelling the dispersion of flashing jets using CFD // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. V. 154, Issues 1–3. Pp. 1198–1209.
DOI: [10.1016/j.jhazmat.2007.11.053](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.053)
- [44] Loureiro D.D., Reutzsch J., Kronenburg A., Weigand B., Vogiatzaki K. Primary breakup regimes for cryogenic flash atomization // *International Journal of Multiphase Flow*. 2020. V. 132. 103405.
DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103405](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103405)
- [45] Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А. Термодинамические свойства азота. Москва: Издательство стандартов, 1977. 352 с.
Sychev V.V., Wasserman A.A., Kozlov A.D., Spiridonov G.A., Tsymarny V.A. Thermodynamic properties of nitrogen. Moscow: Publishing House of Standards, 1977. 352 p. (in Russian).
<https://nauca.ru/ref/Термодинамические-свойства-азота-ГСССД.pdf>
- [46] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F., Korobchinskaya V.A. Equation of state for liquid and gaseous nitrogen in cryogenic temperature range // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2023. V. 44, No. 5. Pp. 1587–1592.
DOI: [10.1134/S1995080223050116](https://doi.org/10.1134/S1995080223050116)
- [47] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Файзуллина Э.А. Аналитическое уравнение состояния азота для жидкой и газовой фаз // *Теплофизика и аэромеханика*. 2024. № 6. С. 1187–1194.
Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F., Fayzullina E.A. Analytical equation of state for liquid and gaseous nitrogen // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2024. No. 6. Pp. 1187–1194.
EDN: xqfapd

- [48] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., Гайнуллина Э.Ф. Моделирование процесса истечения жидкого азота через коническое сопло в вакуумную камеру // Письма в журнал технической физики. 2023. Т. 49, № 24. С. 46–49.
DOI: [10.61011/PJTF.2023.24.56872.107A](https://doi.org/10.61011/PJTF.2023.24.56872.107A)
Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A., Gainullina E.F. Modeling the process of liquid nitrogen outflow through a conical nozzle into vacuum chamber // Technical Physics Letters. 2023. V. 49, No. 12. Pp. 108–111.
<https://journals.ioffe.ru/articles/57601>
- [49] Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A., Gainullina E.F. Modeling the dynamics of a boiling liquid nitrogen jet under cryogenic temperatures // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023. V. 44, No. 5. Pp. 1579–1586.
DOI: [10.1134/S1995080223050104](https://doi.org/10.1134/S1995080223050104)
- [50] Коробчинская В.А. Влияние начальной степени перегрева на эволюцию струи жидкого азота при истечении в вакуумную камеру // Вестник Башкирского университета. 2024. Т. 29, № 1. С. 19–24.
Korobchinskaya V.A. The influence of the initial degree of overheating on the evolution of a jet of liquid nitrogen when flowing into a vacuum chamber // Bulletin of the Bashkir University. 2024. T. 29, No. 1. Pp. 19–24 (in Russian).
DOI: [10.33184/bulletin-bsu-2024.1.4](https://doi.org/10.33184/bulletin-bsu-2024.1.4)
- [51] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., Гайнуллина Э.Ф. Влияние начальных условий в камере низкого давления на степень расширения вскипающей струи жидкого азота // Письма в журнал технической физики. 2024. Т. 50, № 23. С. 23–26.
Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A., Gainullina E.F. Influence of initial conditions in a low-pressure chamber on the degree of expansion of a boiling jet of liquid nitrogen // Technical Physics Letters. 2024. V. 50, No. 23. Pp. 23–26 (in Russian).
DOI: [10.61011/PJTF.2024.23.59393.6455k](https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.23.59393.6455k)

Сведения об авторах / Information about the Authors

Раиса Хакимовна Болотнова

доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН

Raisa Khakimovna Bolotnova

Sc.D. (Phys. & Math.), Senior researcher
Mavlyutov Institute of Mechanics URFS RAS
bolotnova@anrb.ru
ORCID: [0000-0001-5847-7328](https://orcid.org/0000-0001-5847-7328)

Эльнара Айдаровна Файзуллина

Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН

Elnara Aidarovna Faizullina

Mavlyutov Institute of Mechanics URFS RAS
elnara_faizullina@mail.ru
ORCID: [0009-0004-1569-8517](https://orcid.org/0009-0004-1569-8517)