

Научная статья

УДК 532.525; 536.423.1

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-47-64

Истечение этанола в среду с варьируемой степенью разрежения

Александр Сергеевич Яскин¹ ✉
Александр Евгеньевич Зарвин² ✉
Валерий Владимирович Каляда³
Кирилл Алексеевич Дубровин⁴
Виталий Эдуардович Художитков⁵

¹⁻⁵ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹ yas@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5366>

² zarvin@phys.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-5088>

³ v.kalyada@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2739-5017>

⁴ akdubr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9655-1242>

⁵ v.khudozhitkov@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5045-8587>

Аннотация

Представлены экспериментальные результаты наблюдения микроструй этанола, истекающих в сильно разреженную среду (вакуум) через сопло. Изучение процесса производилось как при горизонтальном, так и при вертикальном по направлению силы тяжести истечении жидкости из источника. Соблюдалось условие поддержания в вакуумной камере неизменным давления остаточного газового фона на уровне намного ниже давления насыщенных паров рабочей жидкости при заданной температуре истечения. Показана возможность моделирования сложных процессов истечения микроструй жидкостей в пространство с заданной разреженной атмосферой на компактном вакуумном газодинамическом стенде. Установлено, что длительное истечение из тонкого капилляра или отверстия малого диаметра в вакуум или сильно разреженную газовую среду существенно отличается от хорошо изученных режимов истечения в плотную газовую среду, а также от импульсных режимов истечения в вакуум. В работе описаны основные особенности течения и условия возникновения неустойчивости. Показано, что длительное течение микроструи жидкости в вакууме обладает высокой степенью поверхностной неустойчивости с большим количеством внезапных изменений направления, структуры и наблюдаемой плотности. Предложено объяснение причин разрушения микроструи, обусловленных преимущественно совокупностью капиллярной неустойчивости и интенсивного испарения перегретой жидкости с поверхности струи с образованием поверхностных газовых каверн, вызывающих взрывное разрушение микроструи и выброс парожидкостных капель.

Ключевые слова

микроструя жидкости, поверхностная неустойчивость, моделирование условий вакуума, этанол, насыщенный пар

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке, оказанной Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSUS-2020-0039) и РФФИ (грант № 20-01-00332/20). В экспериментах использовано оборудование ЦКП «Прикладная физика» НГУ

Для цитирования

Яскин А. С., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Дубровин К. А., Художитков В. Э. Истечение этанола в среду с варьируемой степенью разрежения // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 47–64. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-47-64

© Яскин А. С., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Дубровин К. А., Художитков В. Э., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 47–64
Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 47–64

Flow of Ethanol into a Medium with Varying Degrees of Rarefaction

Alexander S. Yaskin¹✉, Alexandr E. Zarvin²✉
Valery V. Kalyada³, Kirill A. Dubrovin⁴
Vitaly E. Khudozhitkov⁵

¹⁻⁵ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹ yas@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5366>

² zarvin@phys.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-5088>

³ v.kalyada@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2739-5017>

⁴ akdubr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9655-1242>

⁵ v.khudozhitkov@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5045-8587>

Abstract

Experimental results of observation of ethanol microjets flowing into a highly rarefied medium (vacuum) through a nozzle are presented. The investigation of the outflow process was carried out both horizontally and vertically in the direction of gravity, when the liquid was expelled from the source. The condition of keeping constant the residual background pressure in the vacuum chamber is much lower than the saturated vapour pressure of the working liquid at a given temperature of the blast. The possibility of simulation of complex processes of the flow of micro-liquids in a space with a given rarefied atmosphere on a compact vacuum gas-dynamic test bench is shown. It is found that the continuous efflux from a thin capillary or a hole of small diameter into a vacuum or a strongly rarefied gaseous medium differs significantly from the well-studied modes of efflux into a dense gaseous medium, as well as from the pulse modes of efflux into a vacuum. The paper describes the main features of the flow and the conditions of the instability emergence. It is shown that the long-term flow of a liquid microjet in a vacuum has a high degree of surface instability, with a large number of sudden changes in direction, structure and observed density. An explanation for the causes of microjet failure, caused mainly by a combination of capillary instability and intense evaporation of superheated liquid from the surface of the jet, is proposed. The formation of surface gas caverns causing explosive collapse of the microjet with ejection of vapor-liquid droplets is established.

Keywords

liquid microjet, surface instability, modelling of vacuum conditions, ethanol, saturated steam

Funding

The work was performed using the shared equipment center “Applied physics” of the NSU Physics Department with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project number FSUS-2020-0039) and RFBR (grant number 20-01-00332/20)

For citation

Yaskin A. S., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Dubrovin K. A., Khudozhitkov V. E. Flow of Ethanol into a Medium with Varying Degrees of Rarefaction. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 47–64. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-47-64

Введение

Один из аспектов внимания исследователей к струйным течениям в вакууме и разреженных средах обусловлен быстрым развитием программ освоения ближнего и дальнего космоса, движением летательных аппаратов различного назначения в разреженных атмосферах планет. Мини- и микроразмерные спутники нового поколения формата CubeSat, активно используемые в таких программах, позволяют решать большое число научных и прикладных задач [1; 2]. Интерес к этим системам вызван низкой стоимостью подготовки к запуску и самого запуска. Недостатком таких спутников, ограничивающим их применение, является небольшая продолжительность жизни, обусловленная практическим отсутствием двигателей коррекции и поддержания орбиты¹. Перспективным и быстро развиваемым направлением исследований является оснащение миниатюрных аппаратов микросопловыми двигателями

¹ www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/small_spacecraft_technology_state_of_the_art_2014.pdf

ми [3–6]. Одним из возможных решений при разработке двигателей ориентации и коррекции малых спутников является использование жидкости, распыляемой из сопла в космическое пространство для получения тяги². С другой стороны, космическое пространство как естественная среда низкого давления приводит к техническим решениям, недоступным в плотной газовой среде. Решения, основанные на явлении мгновенного испарения, обеспечивают системам позиционирования [7], подачи топлива [8], охлаждения – терморегуляции [9] уникальные характеристики и преимущества на большой высоте и в открытом космосе.

Исследования струйных течений перегретых жидкостей в основном выполнены в импульсных или квазистационарных (с малым временем истечения) режимах. Процессы длительного течения микроструй жидкости в метастабильном состоянии в среду с контролируемой степенью разрежения или в глубокий вакуум, соответствующие открытому космосу и разреженным атмосферам планет, а также процессы, происходящие при формировании микроструи маловязкой жидкости, в этих условиях исследованы недостаточно.

Истечение жидкости в разреженную среду (вакуум) сопровождается рядом особенностей, не встречающихся в плотных средах. Рассмотрим некоторые из них. Отсутствие аэродинамического сопротивления газа, окружающего струю в плотной среде, исключает силовое взаимодействие струи с окружающим газом, возмущающее течение и разрушающее струю [10]. В этих условиях важную роль при течении тонких (микронных и субмиллиметровых) струй могут играть особенности поверхностного натяжения, вязкости и процесса испарения. Истечение жидкости из отверстия или сопла в среду с давлением P_b ниже давления P_s насыщенных паров жидкости при температуре T истечения переводит ее в метастабильное состояние (перегретая жидкость). Струйное течение перегретой жидкости за счет интенсивного образования газовой фазы может сопровождаться вскипанием, разрывами струи и другими эффектами, сопровождающими формирование парожидкостного потока.

Экспериментальные и теоретические исследования истечения струй воды в вакуум были выполнены в ряде исследований. Так, в [11] было установлено, что струя истекает из сопла в виде пучка и резко распадается на капли и частицы льда. «Разрывной» механизм объяснен внезапным кипением, вызывающим рост пузырьков пара, разрушающих струю вследствие падения давления в струе перегретой воды. Эксперименты по распаду струй перегретой воды и жидкого азота, истекающих из коротких сопел в атмосферу с давлением ниже давления насыщения, соответствующего температуре жидкости, проанализированы в [12]. Авторы отметили три характерных типа струй: с капиллярным распадом холодной и со вспышечным распадом перегретой воды при отсутствии аэродинамического разрушения струи, а также перегретые струи азота со вспышечным распадом в условиях аэродинамического разрушения. Зарегистрирована значительно большая изменчивость перегретых струй в сравнении с холодными из-за эффекта вспышечного распада струи, вызванного пузырями пара. Показано также существование неразрушающихся перегретых струй при малых степенях перегрева.

Взрывное вскипание в области гомогенного флуктуационного зародышеобразования сильно перегретых струй различных жидкостей в условиях истечения в атмосферу детально описано в [13]. Показано, что взрывное вскипание наблюдается, как правило, при сильном нарушении термодинамического равновесия, в области метастабильных состояний в окрестности критической температуры T_* , когда давление насыщенного пара сильно перегретой жидкости при температуре истечения значительно превышает давление среды. Было показано, что для протекания взрывного вскипания необходим нагрев жидкости до температур $T > 0,9T_*$. При этом вскипание сопровождается бурным фазовым превращением жидкости в пар одновременно во всем объеме струи на гомогенных центрах парообразования. При температурах ниже $0,9T_*$ распад перегретых струй протекает на гетерогенных центрах зародышеобразования. В [14–17] для оценки степени перегрева жидкости по давлению N_s при

² www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/small_spacecraft_technology_state_of_the_art_2014.pdf

истечении в разреженную среду с температурой T_0 использовано отношение давления насыщения $P_s(T)$ на кривой фазового равновесия при температуре T к давлению среды $P_b(T_0)$ ($N_s = P_s(T)/P_b(T_0)$). Можно предполагать, что степень перегрева в предложенном виде не в полной мере отражает формирование и распад микроструй жидкости, истекающих в вакуум. Так, в [18; 19] отмечено, что струйное течение воды может существовать в вакууме без разрывов при сравнительно низких начальных температурах и малых диаметрах потока.

Наряду со степенью перегрева по давлению, глубину захода состояния жидкости в метастабильную область принято характеризовать степенью перегрева ΔT по температуре, которая равна разности температуры истекающей жидкости T_0 и температуры кипения $T_s(P_b)$ ($\Delta T = T_0 - T_s(P_b)$) при давлении разреженной среды, в которой наблюдается течение [14; 18]. В отличие от степени перегрева по давлению степень перегрева по температуре имеет абсолютный характер и не позволяет оценить относительную глубину захода в область перегретых состояний и долю запасенной энергии метастабильной жидкостью.

Сложность и высокая стоимость экспериментального изучения физических процессов в струйных течениях в космическом пространстве обуславливает разработку наземных установок для моделирования течений в вакууме [20; 21]. Наземное моделирование в вакуумных установках истечения потоков жидкости из сопел и каналов и изучение формирования газожидкостных струйных течений модельных жидкостей в разреженных атмосферах различного состава упрощает разработку двигателей и струйных систем различного назначения (см., например, [22–26]) для объектов космической техники. Исследования струйных течений в этих работах были выполнены в импульсных или квазистационарных (с малым временем истечения) режимах в условиях истечения в слаборежеженную среду.

Целью настоящей работы является разработка техники и средств диагностики при моделировании процессов длительного течения микроструй жидкости в среду с контролируемой степенью разрежения, соответствующую открытому космосу (глубокий вакуум), а также разреженным атмосферам планет, и исследование процессов, происходящих при формировании микроструи маловязкой жидкости в этих условиях. Для исследования использована азеотропная смесь этанола 95,57 % (мас) с водой 4,43 % (мас), имеющая высокое давление насыщенных паров при температурах исследования.

Экспериментальная установка

Исследования проведены на газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 Новосибирского государственного университета. Подробное описание экспериментального стенда дано в [27]. Принципиальная схема измерений приведена на рис. 1 [28]. Безмасляная система вакуумирования стенда (1) обеспечила в камере расширения (2) (объемом 0,46 м³) высокое разрежение (до 0,1 мПа) остаточного газа в отсутствие струи жидкости и до 10 мПа при истечении жидкости. Давление в камере расширения P_b варьировалось контролируемой газоподачей и измерялось емкостным вакуумметром, показания которого не зависели от рода газа, с погрешностью 0,2 %.

Наблюдение, фотографирование и видеозапись микроструи исследуемой жидкости в режиме непрерывного истечения осуществлялись фото- и видеоаппаратурой (3) через оптическое окно (4). Время видеорегистрации установившегося течения жидкости составляло 2÷5 минут и ограничивалось только программой эксперимента. Область течения засвечивалась через смотровое окно равномерным источником света. Протяженность участка наблюдения в вертикальном и горизонтальном направлениях превышала 0,3 м.

Сопло (5) термостатировалось на теплопроводе, нагреваемом печью сопротивления, в диапазоне температур $T_0 = 290\div 360$ К. Температура теплопровода и сопла измерялась цифровым термометром сопротивления (6), измерительный датчик которого устанавливался в сверлении теплопровода вблизи сопла. Минимизация поперечного градиента температуры соплового блока достигалась высокой теплопроводностью стенок сопла и слабым теплоотво-

дом с деталей конструкции. Сопло соединялось трубкой из полиамида с сосудом с исследуемой жидкостью (7), размещенным вне вакуумной установки. Температура T жидкости в сосуде контролировалась цифровым термометром сопротивления (8) с погрешностью 0,1 К. Перепад давления ΔP_0 определялся разницей между давлением в сосуде над жидкостью, P_0 , измеряемым мановакуумметром (9), и остаточным давлением в вакуумной камере, P_b , измеряемым вакуумметром (10). Погрешность измерения давления не превышала 1,5 %. Для исследования истечения струй в среду с атмосферным давлением вакуумная камера наполнялась воздухом, а в сосуде с жидкостью создавалось избыточное над атмосферой давление компрессором (11). Для реализации режимов течения жидкости в вакуум при перепадах давления менее 100 кПа сосуд (7) подсоединялся к независимой системе вакуумной откачки (12).

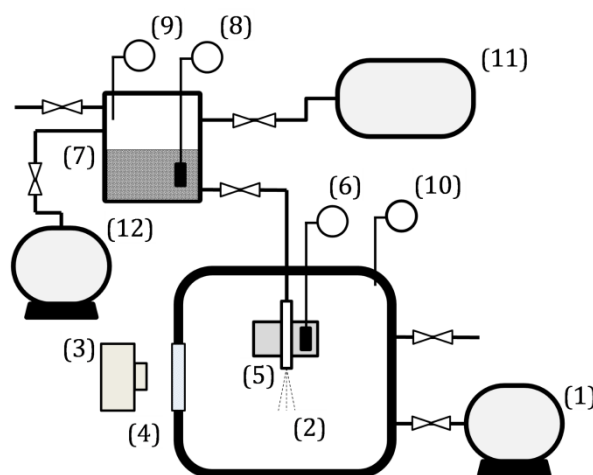


Рис. 1. Схема экспериментальной установки
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

Измерения непрерывного установившегося течения жидкости производились при горизонтальном и вертикальном (сверху вниз относительно вектора силы тяжести) направлении течения микроструй этанола. Предусмотрена возможность изменения P_b в пределах от 0,01 до 600 Па, но в выбранном режиме при проведении экспериментов остаточное (фоновое) давление в вакуумной камере поддерживалось постоянным. Вертикальные микроструи истекали из капилляра (цилиндрическое сопло) из нержавеющей стали длиной $L = 25,1$ мм, внешним диаметром $d = 650$ мкм и внутренним диаметром канала $d_a = 400$ мкм. Горизонтальные микроструи формировались при истечении из отверстия («сопла») в тонкой стенке. В работе использованы сопла трех диаметров, $d_a = 120, 170, 290$ мкм. Скорость истечения этанола из сопла контролировалась по расходу жидкости из мерного объема.

Результаты и обсуждение

Вертикальные микроструи. Истечение из тонкого капилляра

Физические величины, характеризующие режимы исследованных вертикальных микроструй этанола, приведены в табл. 1. Значения коэффициента поверхностного натяжения σ , коэффициента динамической вязкости μ , давления насыщенных паров P_s этанола взяты

из [29] и ГОСТ Р 8.991 – 2020³. Для оценки степени перегрева жидкости (глубины захода в метастабильную область) использовались как относительные, так и абсолютные параметры.

Для оценки степени перегрева этанола по давлению в работе использован параметр $N_s = P_s/P_b$ [15], для оценки степени перегрева по температуре – параметр $\Delta T_s = T_0 - T_s$ [14]. В скобках в таблице показан коэффициент метастабильности по температуре $\varepsilon_L = \bar{c}(T - T_s)/L$ [13] в процентах.

Таблица 1

Экспериментальные режимы истечения вертикальных микроструй этанола

Table 1

Experimental modes of outflow of the vertical ethanol micro-jets

Номер режима	T_0 , К	σ , мПа·м	μ , мПа·с	P_s , кПа	$\Delta P_0 = 100$ кПа				$\Delta P_0 = 20$ кПа			
					P_b , Па	N_s	T_s , К	ΔT_s , К	P_b , Па	N_s	T_s , К	ΔT_s , К
1	295	22	1,16	5,81	100000	0	295	0	100000	0	295	0
2	295	22	1,16	5,81	600	10	262	33 (11)	600	10	262	33 (11)
3	295	22	1,16	5,81	2	3000	201	94 (32)	1	6000	196	99 (34)

Оценим максимальную степень перегрева жидкости по температуре ΔT_s , ведущую к полному разрушению микроструи. Запишем уравнение теплового баланса для процесса испарения жидкости в квазиадиабатических условиях (без учета потерь на конденсацию на поверхности сопла и теплоотвод по конструкции рабочего участка)

$$\bar{c} \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot S \cdot (T_0 - T_s) = L \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot S,$$

где $(T_0 - T_s)$ – температура перегрева жидкой фазы этанола, ρ – ее плотность, $\bar{c}$ – средняя в диапазоне $(T_0 - T_s)$ удельная теплоемкость, $\bar{v}$ – средняя по сечению потока скорость, S – площадь поперечного сечения микроструи. Тогда для максимальной степени перегрева жидкости можно записать

$$\Delta T_{s\max} = (T_0 - T_s) = L / \bar{c}. \quad (1)$$

Как видно из (1), если степень перегрева $\Delta T_s < L / \bar{c}$, то струйное течение представляет преимущественно либо однофазный поток жидкости, либо двухфазный парожидкостный поток. При достижении степени перегрева значения $\Delta T_{s\max}$ возможно образование однофазного потока пара. Выражение (1) согласуется с коэффициентом метастабильности по температуре, предложенном в [13], если его представить в виде отношения

$$\bar{c} \cdot \Delta T_s / L = \varepsilon_L.$$

Приведенные в табл. 1 степени перегрева по температуре при истечении этанола в вакуум в условиях проведения эксперимента далеки от максимального значения $\Delta T_{s\max} = 295$ К. Следует ожидать, что стационарное течение этанола в метастабильном состоянии в условиях отсутствия кавитационных явлений из-за интенсивного поверхностного испарения перегретой жидкости будет представлять собой микрострую с поверхностной неустойчивостью [14].

Фотографии струй этанола для режимов 1–3 (см. табл. 1) показаны на рис. 2. В верхней части фотографий по центру видно светлое изображение конца капилляра (длиной от 3 до 5 мм). В левом углу верхней части фотографий, здесь и ниже, приведен масштабный отрезок

³ ГОСТ Р 8.991 – 2020. Стандартные справочные данные. Этанол жидкий и газообразный. М.: Стандартинформ, 2020. 14 с.

белого цвета длиной 20 мм. Фотографии приведены в разном масштабе из соображений иллюстративной наглядности. При перепаде давления на сопле $\Delta P_0 = 100$ кПа (фотографии на рис. 2, а–е) струя этанола истекала из сопла со скоростью около 7 м/с, при перепаде $\Delta P_0 = 20$ кПа (см. рис. 2, е–к) скорость истечения составила примерно 1,5 м/с. Фотографии выбраны из видеозаписи микроструи при скорости съемки 30 кадров/с. Время записи микроструй позволяло регистрировать квазистационарные периоды течения и их внезапную смену при поддержании неизменными исходных давления и температуры.

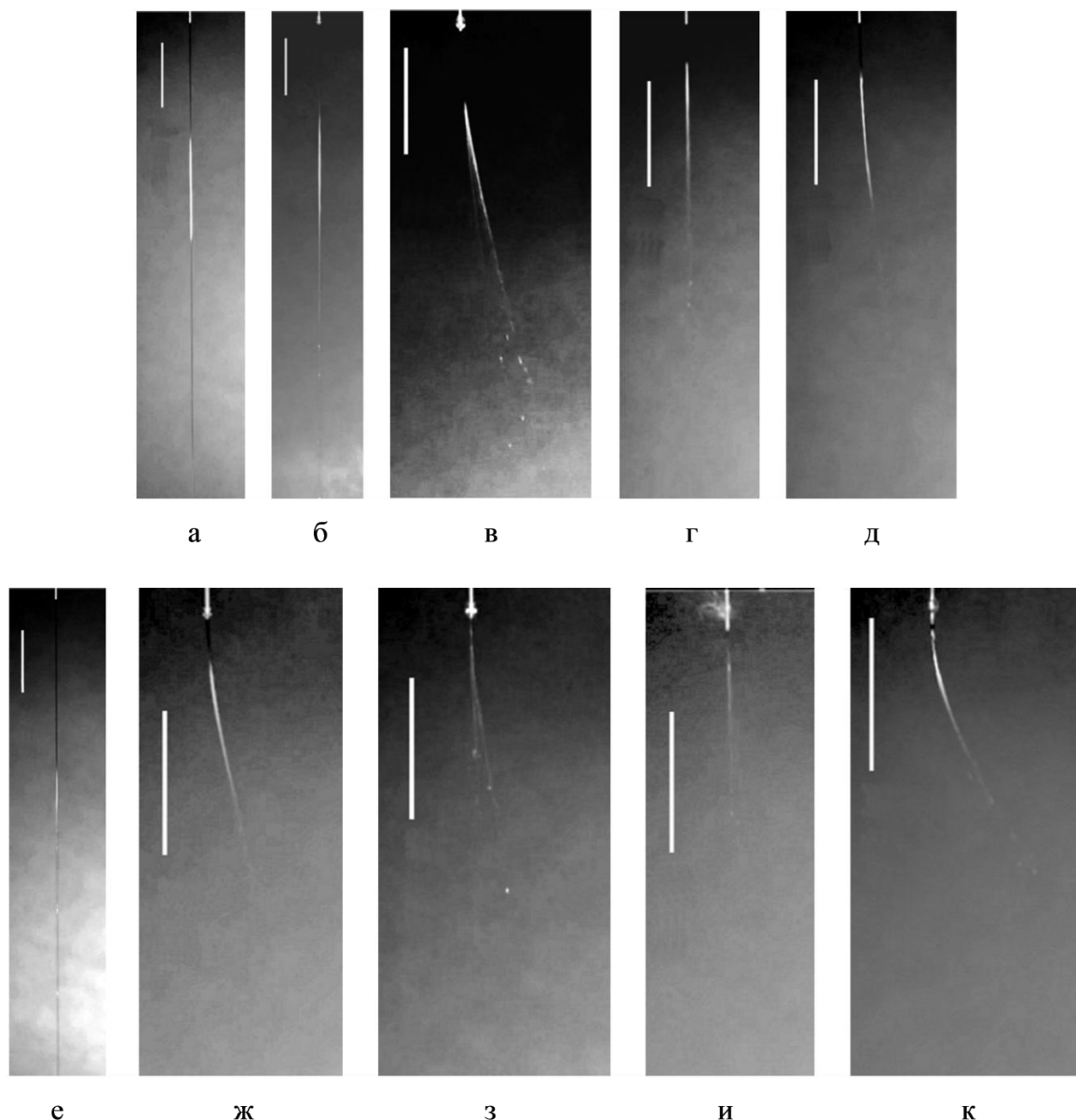


Рис. 2. Микроструи этанола при температуре 295 К
Истечение в атмосферу: режим 1 – фотографии а, е
Истечение в вакуум при перепаде $\Delta P_0 = 100$ кПа: режим 2 – б, в; режим 3 – г, д
Истечение в вакуум при перепаде $\Delta P_0 = 20$ кПа: режим 2 – ж, з, и; режим 3 – к

Fig. 2. Ethanol micro-jetting at 295 K
Outflow into atmosphere: mode 1 – pictures а, f
Outflow into vacuum at difference $\Delta P_0 = 100$ kPa: mode 2 – b, c; mode 3 – d, e
Outflow into vacuum at difference $\Delta P_0 = 20$ kPa: mode 2 – g, h, i; mode 3 – j

Как показали проведенные в настоящей работе исследования, течение микроструй жидкости в вакуум существенно отличается как от течения струй из сопел большого диаметра в атмосфере [30], так и от квазистационарного течения в область с разрежением [23]. Наблюдаются также различия изученных в работе микроструй при длительном истечении в вакуум с результатами [14–18]. Микроструя этанола на снимках наблюдается от выходного отверстия сопла в виде узкого длинного цилиндра темного (почти черного) цвета, на некотором расстоянии достаточно резко меняющего цвет на светлый. Для рис. 2 выбраны характерные мгновенные фотографии микроструи из видеоряда со случайным отклонением вправо от наблюдателя. Следует отметить, что во время истечения наблюдалось образование микроструй других форм и ориентаций, вплоть до полного распыления этанола с образованием паровой (парогазожидкостной) фазы, не регистрируемой либо недостаточно отчетливо регистрируемой на фотографиях. Отдельные примеры фотографий струй подобной формы, без обсуждения возможных причин изменений, приведены на рис. 3, *в–е*.

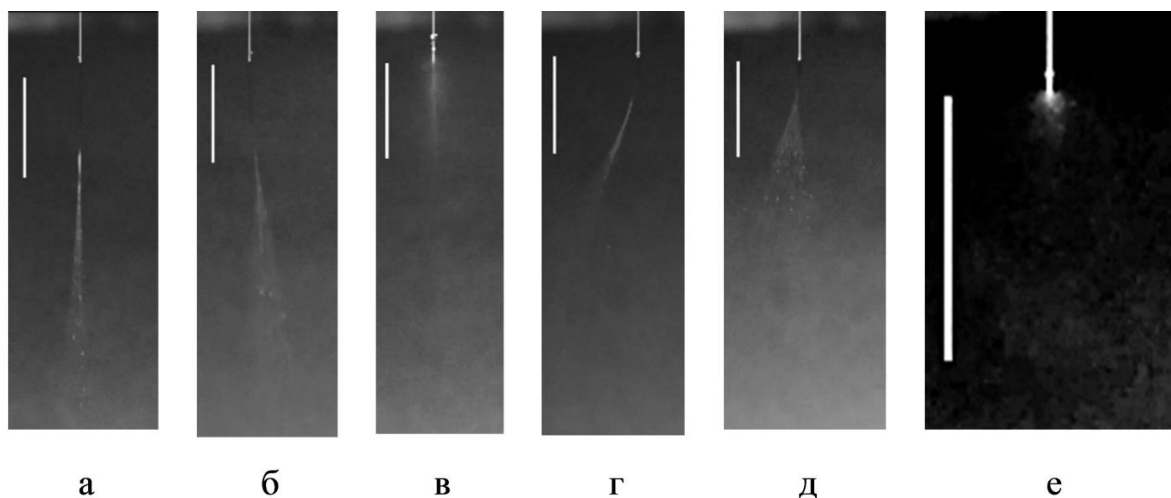


Рис. 3. Истечение этанола из капилляра в разреженную среду в режиме 3 (см. табл. 1).

Перепад давления на капилляре: *а–в* – $\Delta P_0 = 100$ кПа; *г–е* – $\Delta P_0 = 20$ кПа

Fig. 3. Outflow of ethanol from the capillary into the dilute medium in mode 3 (Table 1).

Pressure drop across the capillary: *а–с* – $\Delta P_0 = 100$ kPa; *д–f* – $\Delta P_0 = 20$ kPa

Микроструи этанола рис. 2, *а, е*, наблюдаемые при истечении в атмосферу при комнатной температуре (режим 1 табл. 1), не изменяли направление течения в процессе наблюдения, оставаясь прямолинейными. Эти струи формировались в условиях аэродинамического сопротивления и имели типичный вид, характерный для истечения жидкости в атмосфере. Как известно, в таких условиях струя состоит из двух участков: компактного и раздробленного [31]. Раздробленный участок следует за компактным и определяется воздушной аэрацией поверхности струи. Компактная часть на фотографиях наблюдается в виде темной полосы ниже сопла. Раздробленный участок струи начинается яркой светлой областью вследствие отражения света от мелких капель газокapельной среды.

Далее, по мере испарения жидкости ниже по течению в условиях фронтального освещения следовало бы ожидать постепенную фрагментацию и диссипацию потока. Однако на фотографиях рис. 2, *а, е* после светлой слабо расширенной струи наблюдается новый темный участок. Объяснение возникшего распределения освещенности областей струи неоднородностью светового потока от источника света опровергается как предварительными калибровками, так и результатами спонтанного изменения распределения полей яркости по длине микроструи при изменении характера течения в ходе одной и той же видеорегистрации.

На представленных выборочных фотографиях с предположением неравномерного распределения светового потока не согласуется также распределение яркости изображения по длине микроструи. Темная часть струи за светлой областью на рис. 2, *а* на расстоянии 150 мм от сопла переходит в светлую с размытыми границами. На рис. 2, *е* темная область микроструи, расположенная за светлой, прерывается яркими световыми вспышками, отражающими неоднородности в толщине струи из-за ее распада.

Неустойчивость микроструй возрастает с понижением перепада давления на сопле и в камере расширения (режимы 1–3 табл. 1). В режиме 2 при перепаде давления 100 кПа наблюдается некоторый период прямолинейной микроструи (рис. 2, *б*), похожей по структуре на струи, наблюдаемые в режиме 1, но раздробленный участок начинается ближе к соплу и более выражен.

Общей тенденцией микротечений в вакууме является образование криволинейных струй. Появление такой формы отмечается в режиме 2 при перепаде давления 100 кПа (рис. 2, *в*) в виде короткой полностью распавшейся на участке наблюдения изогнутой струи. Длина микроструи и ее характерные участки значительно короче (примерно в 2 раза) размеров прямой микроструи из той же видеозаписи на рис. 2, *б*.

На рис. 2, *з, д* при перепаде давления 100 кПа зафиксированы изогнутые микроструи. С понижением перепада давления до 20 кПа (рис. 2, *ж–и*) при неизменной степени перегрева по давлению, $N_s = 10$, прямолинейные течения, как на рис. 2, *к*, наблюдаются крайне редко, изгиб микротечений возрастает, а длина полностью распавшихся струй уменьшается по сравнению с рис. 2, *б, в*. Значительный рост степени перегрева по давлению N_s с 10 до 6000 не приводит к существенному изменению длины струи (при сравнении рис. 2, *ж, з*).

Наряду с отмеченными выше формами микроструй (см. рис. 2) со слабо выраженным распадом по длине струи в процессе истечения можно также наблюдать процессы, приведенные на рис. 3. Параметры течения рис. 3 соответствуют режиму 3 табл. 1. С понижением давления в сосуде с исследуемой жидкостью (режим 3) возрастает влияние степени перегрева по давлению на форму и длину микроструи. Длина струй и их характерных отрезков уменьшается, формируются короткие полностью распавшиеся струи, снижается устойчивость течения, которое чаще меняет форму и ориентацию в пространстве. Микроструи на рис. 3, *а, б* при перепаде 100 кПа после компактного (темного) участка «взрывообразно» распадаются в конусную парожидкостную струю произвольной ориентации с углом $2\alpha = 8\text{--}13^\circ$. Так, на рис. 3, *а* распад начинается после короткого, длиной около 10 мм, участка переменной яркости, переходящего в парожидкостную фазу с яркими вкраплениями крупных капель. На рис. 3, *б* распад происходит сразу после темного участка с образованием широкой конусной парожидкостной струи. Струи этанола при перепаде 20 кПа (рис. 3, *з, д*) – более короткие с характерными участками меньшей протяженности. Конус парожидкостной струи с «взрывным» (вспышечным) распадом достигает углов $2\alpha = 30\text{--}60^\circ$.

На рис. 3, *е, е* приведены наблюдавшиеся «взрывные» (вспышечные) парожидкостные течения с плохо выраженной структурой без начального участка устойчивой жидкой фазы. На рис. 3, *е* для наглядности структура приведена в укрупненном масштабе и с большей контрастностью. Хорошо видно каплю жидкости, поднявшуюся вверх по капилляру, а также отсутствие струи жидкости. В этом случае, как предполагается, испаряющаяся жидкость образовала газовую пробку внутри капилляра, после выдавливания которой процесс истечения жидкой фазы возобновился. Таким образом, подтверждается возможность газоотделения или испарения жидкости внутри капилляра.

Внезапные изменения направления течения (см. рис. 2, 3), «взрывное» разбрызгивание микроструи в конус, взрывное испарение (см. рис. 3) наблюдались многократно в произвольные промежутки времени, чередующиеся с периодами «традиционного» течения. Течение пара этанола от капилляра, как показывает анализ видеозаписей, может быть направлено не только по оси истечения (рис. 3, *е*), но и перпендикулярно к ней, а также против направления истечения. О наличии давления, действующего вдоль капилляра против силы тяжести, и па-

ров жидкости над выходным сечением сопла можно судить по поведению капель этанола на капилляре.

Капли образуются на поверхности капилляра практически во всех вакуумных экспериментах. Впервые это явление было обнаружено в работах [22; 23] при исследовании течения пристенной пленки этанола со спутным газовым потоком из сопла в разреженное пространство. Позднее эффект наблюдали в [18] при истечении перегретой воды из капилляра. В наших экспериментах капли на капилляре видны на рис. 2, б, в, з, к, а также на всех фотографиях рис. 3. Размер капли в состоянии максимального формирования в 3–4 раза больше внешнего диаметра капилляра. Капли большего размера перестают удерживаться на поверхности и под действием гравитационных сил сползают вниз к концу капилляра. Достигнув выходного отверстия капилляра, капля сталкивается с истекающей струей, вызывая ее взрывное разрушение с образованием парожидкостного потока. Капля в этом процессе разбрызгивается в направлении, поперечном оси потока, а также под углами вверх и вниз от направления потока. Возможен и другой вариант эволюции капли: быстрый рост с подъемом вверх по капилляру. При этом наблюдается деформация формы капли. Характер деформации свидетельствует о силовом воздействии на каплю восходящего газового потока с давлением, согласно оценке, порядка 20–30 Па. В конечной стадии формирования капля сбрасывается с капилляра и разбрызгивается преимущественно вверх и в стороны.

Пример проявления отмеченного эффекта проявился в сбросе и последующем разбрызгивании капли перпендикулярно поверхности капилляра на рис. 2, и. Как показал анализ видеозаписей, подъем капли вверх по капилляру может достигать 20 мм. Согласно оценке, максимальный диаметр капли, удерживаемой силами поверхностного натяжения на капилляре, может иметь размер около 3 мм при 295 К и возрастать на 15–20 % при снижении температуры до 200 К. Экспериментально наблюдаемый размер капли близок к приведенной оценке.

Таким образом, температура истекающей жидкости, давление среды в области расширения и перепад давления на выходе из капилляра являются наиболее важными параметрами, определяющими устойчивость и форму потока. При истечении в вакуум наблюдается ряд форм неустойчивых течений в зависимости от степени перегрева. При малых степенях образуются прямые струи с одним или множественными разрывами, которые вызваны пузырьками пара при мгновенном испарении. С ростом степени перегрева неустойчивость течения, связанная с процессами мгновенного испарения, возрастает, образуются диспергированные двухфазные потоки.

Горизонтальные микроструи. Истечение из отверстия

Горизонтальные микроструи, исследованные в работе, моделировали истечение жидкости в вакуум через отверстие в тонкой стенке. Рассмотрено истечение этанола из отверстий трех размеров: 120, 170, 290 мкм. В исследованных режимах, аналогично истечению из капилляра, велась видеозапись течения на протяжении нескольких минут. Ниже, на рис. 4 и 5 приведены мгновенные фотографии наиболее характерных изменений формы и геометрии потоков. В нижней части рисунков указаны масштабные отрезки белого цвета длиной 20 мм.

Как показали эксперименты, горизонтальные микроструи из отверстия характеризуются более значительной неустойчивостью и разнообразием криволинейных форм в сравнении с вертикальными микроструями, рассмотренными выше. Молекулярные силы в струе столь значительны, что результат их действия превышает гравитационную силу, вызывая изменения течения микроструи, не согласующиеся с направлением течения в гравитационном поле. Например, при малом перепаде давления (рис. 4, а) горизонтальная микроструя при истечении внезапно изгибается вверх практически до вертикальной. При этом на конечном участке формируется «булавообразный» венчик, после чего струя переходит в состояние «взрывного» разбрызгивания. Угол конуса разлета частиц, движущихся почти прямолинейно (что свидетельствует о высокой начальной скорости частиц), превышает 90°.

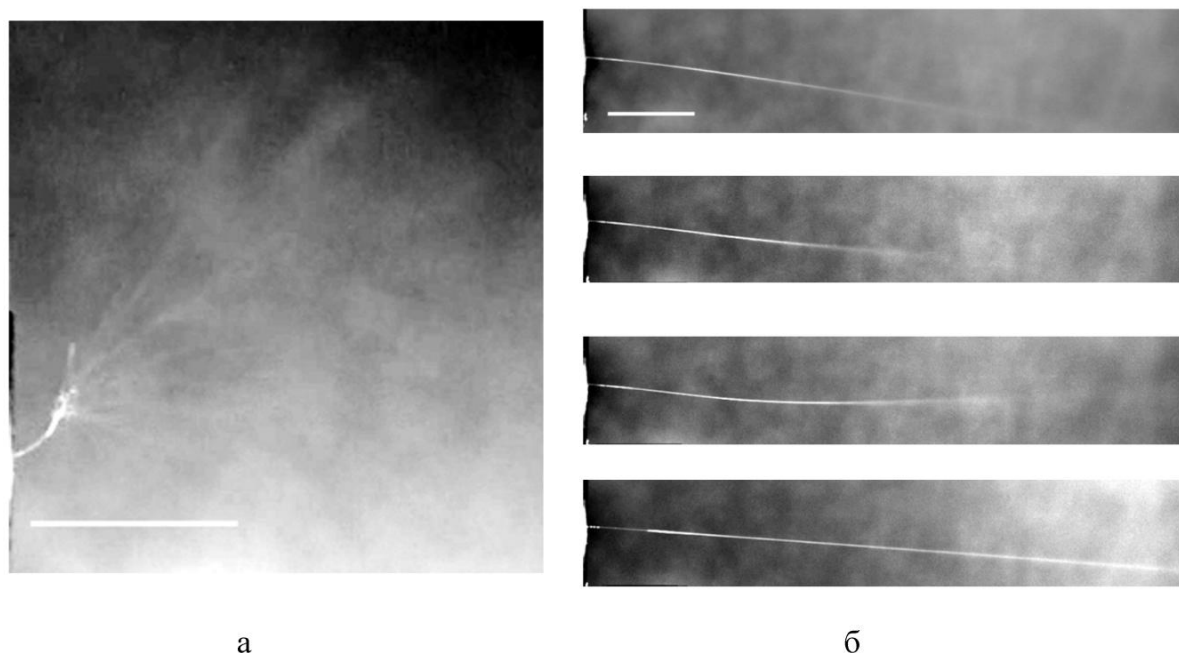


Рис. 4. Горизонтальное истечение этанола из отверстия диаметром $d_a = 120$ мм при температуре $T = 295$ К:
 $a - \Delta P_0 = 16$ кПа, $P_b = 0,4$ Па; $б - \Delta P_0 = 100$ кПа, $P_b = 1$ Па
 (микроструя в последовательно выбранные случайные моменты времени)

Fig. 4. Horizontal outflow of ethanol from orifice with diameter $d_a = 120$ mm at temperature $T = 295$ K:
 $a - \Delta P_0 = 16$ kPa, $P_b = 0.4$ Pa; $b - \Delta P_0 = 100$ kPa, $P_b = 1$ Pa
 (microjet at successively chosen random moments of time)

На рис. 4, б показано спонтанное изменение направления и формы микроструи из отверстия диаметром 120 мкм в процессе ее истечения при перепаде давления на отверстии 100 кПа в последовательные (сверху вниз) отрезки времени. После очень короткого горизонтального участка, струя жидкости внезапно меняет направление потока и искривляется, отклоняясь вниз вплоть до участка «распыления». Кривизна струи здесь согласуется с направлением силы тяжести. В следующих временных промежутках после некоторого участка течения в направлении силы тяжести, движение струи меняется на направленное против силы тяжести. Затем течение преобразуется в нисходящее, близкое к линейному. Изменение направления течения нельзя объяснить особенностями записи изображения. Форма течения, приведенная на каждой из фотографий, стабильна некоторый, но не одинаковый промежуток времени, причем процесс изменения происходит практически мгновенно. Необходимо отметить, что, согласно наблюдениям, резкие изменения направленности и формы струи происходили преимущественно после внезапного возникновения короткого участка более яркого свечения.

На рис. 5 показаны изображения микроструй этанола, истекающих из сопел разного диаметра. Параметры течений указаны в табл. 2. На рис. 5, а в левом нижнем углу указан масштабирующий отрезок длиной 20 мм. При этом на данном рисунке все фотографии приведены в одинаковом масштабе.

Степень перегрева по давлению «холодного» этанола (табл. 2) для рассматриваемых течений значительна и изменяется от 840 до 13000, но в процессе распада струй это обстоятельство практически не проявляется. Микроструи, истекающие из отверстий разного диаметра, при одинаковом перепаде давления, несмотря на различие в диаметрах, не имеют существенных различий в форме. Микроструи из отверстий с $d_a = 170$ мкм и $d_a = 290$ мкм имеют разрывы в течении струи, показанные в увеличенном размере на вставках слева на рис. 5, з, д соот-

ветственно. Расстояние от плоскости отверстия до первого разрыва для меньшего отверстия составляет $25d_a$, для большего – $8d_a$. Также следует отметить резкий поворот горизонтальной микроструи, истекающей из сопла с $d_a = 170$ мкм, в области первого разрыва к прямолинейному течению под углом $4-5^\circ$ вверх против силы тяжести. Разрывы можно интерпретировать как всплывающее кипение [12].

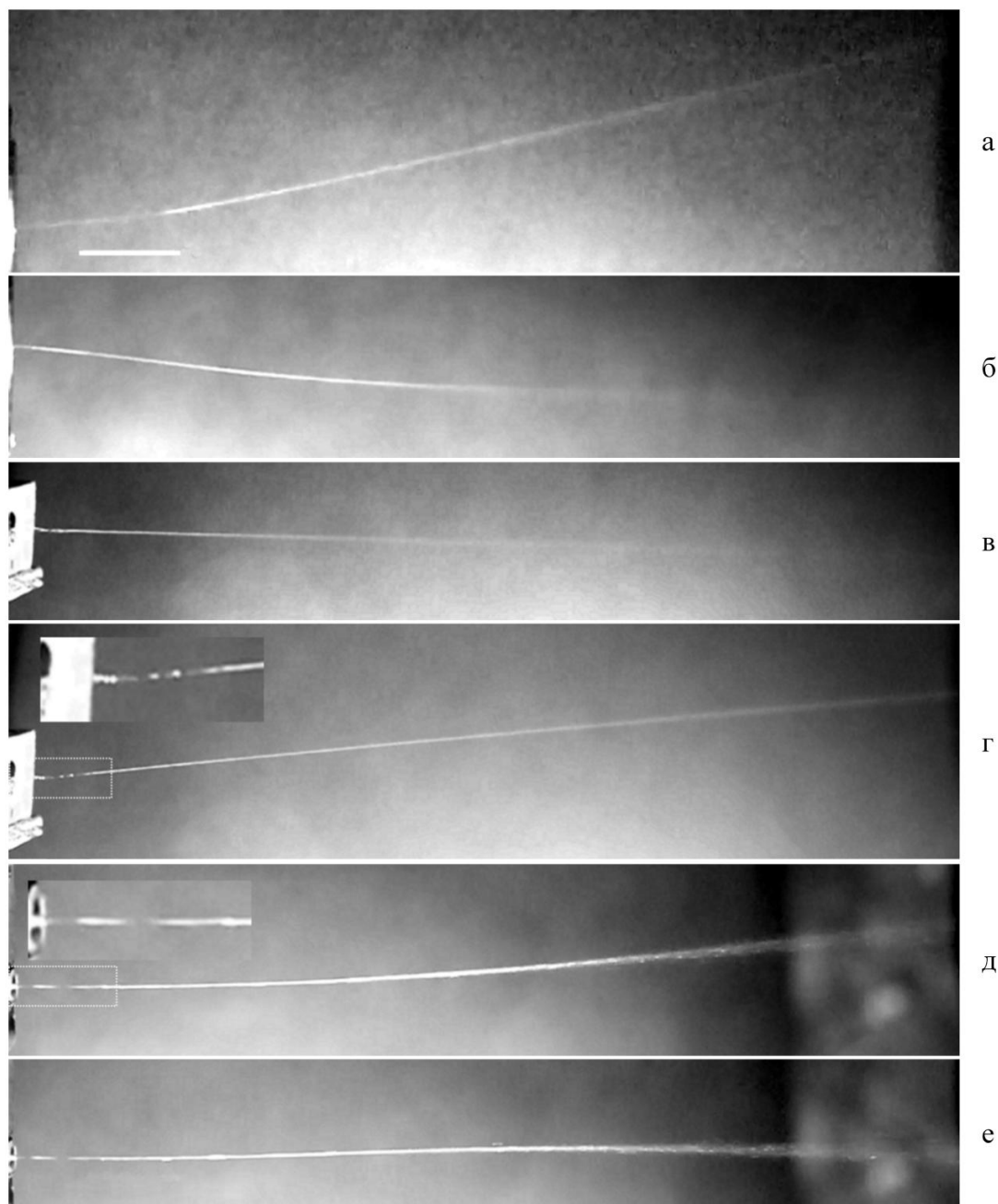


Рис. 5. Влияние сечения сопла на формирование горизонтальных микроструй
а, б – $d_a = 120$ мкм; в, г – 170 мкм; д, е – 290 мкм. Перепад давления $\Delta P_0 = 100$ кПа

Fig. 5. Influence of nozzle cross-section on the formation of horizontal micro-jets
а, б – $d_a = 120$ μm; в, г – 170 μm; д, е – 290 μm. Pressure drop $\Delta P_0 = 100$ kPa

Таблица 2

Параметры истечения микроструй на рисунке 5

Table 2

Parameters outflow of the micro-jet in Figure 5

Рис. 5	$T_{\text{сопла}},$ К	$P_b,$ Па	$P_s,$ кПа	$T_s,$ К	N_s	$T_0 - T_s (\varepsilon_L),$ К
а	294	1,2	6,1	197	5100	97 (33 %)
б	294	1,2	6,1	197	5100	97 (33 %)
в	300	0,67	8,7	193	13000	107 (36 %)
г	300	0,67	8,7	193	13000	107 (36 %)
д	299	7,7	8,2	213	1100	86 (29 %)
е	295	7,7	6,5	213	840	82 (28 %)

Можно предположить, что наблюдаемые изменения формы микроструй обусловлены интенсивным испарением с поверхности струи перегретого этанола и реактивным действием образующегося пара. Для объяснения наблюдаемых форм можно привлечь модель барокапиллярной неустойчивости течений, описанную в [13; 32]. В рамках этой модели следует предположить, что разрушение течения вызвано испарением перегретой жидкости преимущественно из углублений на поверхности, возникающих вследствие капиллярной неустойчивости. Появление углублений увеличивает тепловой поток к углублению, вызывает рост испарения с его поверхности и увеличивает реактивное воздействие пара на поверхность, ускоряя развитие углубления. Струя пара из образовавшегося углубления или цепочки углублений реактивным воздействием на поверхность тонкой струи изменяет направление ее течения (рис. 4, б; 5). Возможно схлопывание поверхностных каверн перегретого потока реактивным действием на их поверхность испарившейся жидкости. Интенсивное накопление насыщенного пара в образовавшихся паровых пузырьках может привести к увеличению диаметра струи (рис. 4, а) и последующему взрывному разбрызгиванию образовавшегося вздутия. С понижением перепада давления струя этанола укорачивается, растет ее неустойчивость, микроструя переходит в стадию распыления на меньшем удалении от сопла. Возможна ориентация струи вверх, в сторону и вниз. Кривизна струйного течения не согласуется с гравитационным законом. На течение существенное влияние оказывает понижение температуры истекающей жидкости из-за испарения.

Заключение

Разработка и использование вакуумных установок для моделирования истечения потоков жидкости из сопел и каналов с целью изучения формирования газожидкостных струйных течений модельных жидкостей в разреженных атмосферах различного состава актуальны при создании двигателей и струйных систем различного назначения объектов космической техники. Результаты настоящей работы демонстрируют возможность изучения сложных процессов истечения микроструй жидкостей в вакуум или затопленное пространство с заданной разреженной атмосферой на компактной вакуумной установке НГУ.

В измерениях при длительном истечении микроструй жидкости в вакуум (сильно разреженную среду) обнаружены отличия в процессах истечения как из отверстия, так и из длинного капилляра по сравнению с имеющимися в литературе результатами. Прежде всего, это крайняя неустойчивость форм течения, относительно стабильных при измерениях за очень короткие промежутки времени (импульсные режимы течения). Сопоставление течений этанола в атмосфере и вакууме показывает, что микроструи жидкости в вакууме из-за перехода

жидкости в метастабильное состояние обладают высокой интенсивностью поверхностной неустойчивости. Микроструи этанола в вакууме в исследованных стационарных режимах, как правило, характеризуются высокой изменчивостью размеров и форм, наблюдаемых при истечении. Микроструи при неизменных режимных параметрах: температуре жидкости, перепаде давления на сопле, давлении в камере расширения – подвергаются изгибным деформациям, отклонению от прямолинейного течения, изменению линейных размеров и самопроизвольному распаду.

При истечении этанола из длинного капилляра в вакуум вдоль силы тяжести образуются разрушенные с поверхности, слабо расходящиеся, короткие, криволинейные микроструи. Микроструи этого типа нестабильны во времени и изменяются случайным образом по размеру и направлению. Наличие в струе гетерогенных центров зародышеобразования способствует «взрывному» вскипанию микроструи вниз по потоку с образованием конусообразного парожидкостного потока с углами раскрытия до 60° , зависящими от перепада давления на сопле. Появление кавитационных пузырьков на срезе капилляра порождает парожидкостную струю, распространяющуюся по всем направлениям от центра выходного отверстия.

Вблизи выходного отверстия капилляра, из которого вытекает парожидкостная струя, генерируются капли, быстро увеличивающиеся в объеме. Капли в процессе роста поднимаются по капилляру обратным парожидкостным потоком до момента разрушения и сброса с капилляра разбрызгиванием.

Горизонтальные микроструи этанола, истекающие из отверстия в тонкой стенке, обладают более значительными потенциями к изменению формы. Вскипание или разбрызгивание струи, а также внезапное изменение направления течения происходят, как правило, после возникновения особенностей, характеризующихся более ярким отраженным светом и изменением локальной геометрии струи в точке бифуркации. Парообразование, а также расширение парожидкостной фазы носит спонтанный характер.

Наблюдаемые в экспериментах перегревы этанола существенно меньше оценки максимального перегрева 290–300 К для перехода этанола в область состояний гомогенного зародышеобразования. При малых степенях перегрева разрушение струи, по-видимому, определяется преимущественно поверхностной неустойчивостью в условиях интенсивного испарения с поверхности микроструи. В этих условиях микроструи этанола относительно стабильны и имеют достаточно протяженный устойчивый участок даже при малых перепадах давления. Реактивное действие пара на поверхность микроструи формирует ее криволинейную форму. Предполагается, что разрушение микроструи обусловлено, в основном, наложением двух явлений: капиллярной неустойчивости и интенсивного испарения перегретого этанола с поверхности микроструи.

Исходя из полученных фотографий, можно предположить, что при малом перепаде давления на выходе из источника локальные нарушения поверхности микроструи, вызванные капиллярной неустойчивостью и интенсивным испарением, образуют поверхностные газовые каверны. Каверны играют роль объемных центров зародышеобразования. Интенсивное парообразование в образовавшихся центрах завершается взрывным разрушением микроструи с выбросом в точке образования парожидкостных пузырьков и капель жидкости, что приводит к разнообразным изменениям структуры струи.

Список литературы

1. **Nieto-Peroy C., Emami M. R.** CubeSat mission: from design to operation. *Appl. Sci.*, 2019, vol. 9, p. 3110. DOI 10.3390/app9153110
2. **Heidt H., Puig-Suari J., Moore A., Nakasuka S., Twiggs R.** CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation. In: *AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Aug. 21–24, 2000, SSC00-V-5.

3. **Fonda-Marsland E., Roberts G., Gibbon D., Ryan C.** Development of a low-cost 0.1N high test peroxide thruster using additive manufacturing. In: AIAA 2019-4227, AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, August 2019. DOI 10.2514/6.2019-4227
4. **Ryan C. N., Fonda-Marsland E., Roberts G. T., Lear A., Fletcher E., Giles L., Palmer M. J., Gibbon D.** Experimental validation of a 1-Newton Hydrogen Peroxide Thruster. *J. Propulsion and Power*, 2020, vol. 36, pp. 158–166.
5. **Ma W., Zhai S., Zhang P., Xian Y., Zhang L., Shi R., Sheng J., Liu B., Wu Z.** Research Progresses of flash evaporation in aerospace applications. *Internat. J. Aerospace Eng.*, 2018, vol. 2018, 3686802, pp. 1–15. DOI 10.1155/2018/3686802
6. **Papale W. G., Roy R. J.** A water-based propulsion system for advanced spacecraft. In: Collection of Technical Papers – Space 2006 Conference, 2006, vol. 1, pp. 426–438.
7. **Joslyn T., Ketsdever A.** Constant Momentum Exchange Between Microspacecraft Using Liquid Droplet Thrusters, AIAA 2010-6966. In: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 2010 (Nashville, TN), 2012. DOI 10.2514/6.2010-6966
8. **Корольков А. В., Сапожников В. Б.** Некоторые задачи прикладной промышленной математики в инженерном обеспечении космических полетов // Обзорные прикладной и промышленной математики. 2016. Т. 23. С. 363–366.
9. **Раубе С. С., Красночуб Е. К., Бронштейн В. М.** Струйная модель теплообмена рабочих тел (теплоносителей) и расчет основных параметров капельных холодильников перспективных космических аппаратов // Вестник Самар. гос. аэрокосмического ун-та. 2010. № 2. С. 50–61.
10. **Левич В. Г.** Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 700 с.
11. **Fuchs H., Legge H.** Flow of a water jet into vacuum. *Acta Astronautica*, 1979, vol. 6, pp. 1213–1226. DOI 10.1016/0094-5765(79)90066-3
12. **Lienhard J. H., Day J. B.** The breakup of superheated liquid jets. *ASME. J. Basic Eng.*, September 1970, vol. 92, pp. 515–521. DOI 10.1115/1.3425051
13. **Скрипов В. П.** Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
14. **Kurschat T. H., Chaves H., Meier G. E. A.** Complete adiabatic evaporation of highly superheated liquid jets, *J. Fluid Mech.*, 1992, vol. 236, p. 43. DOI 10.1017/S0022112092001332
15. **Simões-Moreira J. R., Angelo E., Vieira M. M.** Highly expanded flashing liquid jets. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2002, vol. 16, pp. 415–424. DOI 10.2514/2.6695
16. **Vieira M. M., Simões-Moreira J. R.** Low-pressure flashing mechanisms in iso-octane liquid jets. *J. Fluid Mech.*, 2007, vol. 572, pp. 121–144. DOI 10.1017/S0022112006003430
17. **Lu X. X., Li L., Luo K. H., Ren X. B., Liu Y., Yan X. F.** Investigation on the dispersal characteristics of liquid breakup in vacuum. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2015, vol. 30, pp. 1–8. DOI 10.2514/1.T4665
18. **Du W.-F., Li K., Wang Sh.-F., Zhao J.-F.** Flashing liquid jets in low-pressure environment. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2013, vol. 1, pp. 173–180. DOI 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2013007173
19. **Orme M., Muntz E. P., Legge H., Koppenwallner G.** Cavitation of liquid streams in a vacuum. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 1988, vol. 2, pp. 274–276. DOI 10.2514/3.97
20. **Герасимов Ю. И., Ярыгин В. Н.** Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия 1. Истечение струй в вакуум // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т. 13, вып. 1. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-1/articles/295>
21. **Герасимов Ю. И., Ярыгин В. Н.** Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия 2. Истечение в затопленное пространство // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т. 13, вып. 2. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-2/articles/315>
22. **Приходько В. Г., Чекмарёв С. Ф., Ярыгин В. Н., Ярыгин И. В.** Сверхзвуковое истечение газа из сопла в вакуум с пристенной пленкой жидкости: эффект подъема пленки

- по наружной поверхности сопла против сил тяжести // Доклады РАН. 2004. Т. 39, № 5. С. 618–620.
23. **Yarygin V. N., Prikhodko V. G., Yarygin I. V., Vyazov Yu. N.** Effect of physical properties of liquid on the outflow of the wall liquid film with the co-current gas flow from the nozzle into vacuum. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 5, pp. 651–653. DOI 10.1134/S0869864315050145
 24. **Yarygin V. N., Prikhodko V. G., Yarygin I. V., Gerasimov Yu. I., Krylov A. N., Skorovarov A. Yu.** Near-wall liquid film flows for space applications. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018, vol. 1105, 012079. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012079
 25. **Prikhodko V. G., Yarygin V. N., Yarygin I. V.** Experimental study of droplet detachment from liquid film surface by a co-current flow inside the nozzle stagnation chamber. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012148. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012148
 26. **Prikhodko V. G., Yarygin V. N., Yarygin I. V.** Control of droplet phase angular distribution under near-wall liquid film ejection with co-current gas flow from the supersonic nozzle into a vacuum. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012149. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012149
 27. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Yaskin A. S., Khudozhnikov V. E., Gimelshein S. F.** Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-Temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2017, vol. 45, no. 5, pp. 819–827. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
 28. **Yaskin A. S., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Dubrovnikov K. A., Khudozhnikov V. E.** Features of formation of a fluid flow flowing into a highly rarefied medium through a capillary. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012158. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012158
 29. **Стабников В. Н., Ройтер И. М., Процюк Т. Б.** Этанол. М., 1976. 272 с.
 30. **Дымент О. Н., Казанский К. С., Мирошников А. М.** Гликоли и другие производные окиси этилена и пропилена / Общ. ред. О. Н. Дымент. М.: Химия, 1976. 373 с.
 31. **Альтшуль А. Д.** Гидравлическое сопротивление. 2-е изд. М., 1982. 224 с.
 32. **Павлов П. А., Исаев О. А.** Барокапиллярная неустойчивость поверхности свободной струи перегретой жидкости // ТБТ. 1984. Т. 22, вып. 4. С. 745–752.

References

1. **Nieto-Peroy C., Emami M. R.** CubeSat mission: from design to operation. *Appl. Sci.*, 2019, vol. 9, p. 3110. DOI 10.3390/app9153110
2. **Heidt H., Puig-Suari J., Moore A., Nakasuka S., Twiggs R.** CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation. In: AIAA/USU Conference on Small Satellites, Aug. 21–24, 2000, SSC00-V-5.
3. **Fonda-Marsland E., Roberts G., Gibbon D., Ryan C.** Development of a low-cost 0.1N high test peroxide thruster using additive manufacturing. In: AIAA 2019-4227, AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, August 2019. DOI 10.2514/6.2019-4227
4. **Ryan C. N., Fonda-Marsland E., Roberts G. T., Lear A., Fletcher E., Giles L., Palmer M. J., Gibbon D.** Experimental validation of a 1-Newton Hydrogen Peroxide Thruster. *J. Propulsion and Power*, 2020, vol. 36, pp. 158–166.
5. **Ma W., Zhai S., Zhang P., Xian Y., Zhang L., Shi R., Sheng J., Liu B., Wu Z.** Research Progresses of flash evaporation in aerospace applications. *Internat. J. Aerospace Eng.*, 2018, vol. 2018, 3686802, pp. 1–15. DOI 10.1155/2018/3686802
6. **Papale W. G., Roy R. J.** A water-based propulsion system for advanced spacecraft. In: Collection of Technical Papers – Space 2006 Conference, 2006, vol. 1, pp. 426–438.
7. **Joslyn T., Ketsdever A.** Constant Momentum Exchange Between Microspacecraft Using Liquid Droplet Thrusters, AIAA 2010-6966. In: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 2010 (Nashville, TN), 2012. DOI 10.2514/6.2010-6966

8. **Korolkov A. V., Sapozhnikov V. B.** Some problems of applied industrial mathematics in spaceflight engineering. *Rev. Applied Industr. Math.*, 2016, vol. 23, pp. 363–366. (in Russ.)
9. **Raube S. S., Krasnochub E. K., Bronstein V. M.** Jet model of working body (coolant) heat exchange and calculation of basic parameters of drop refrigerators for advanced spacecraft. *Vestnik of Samara State Aerospace University*, 2010, no. 2, pp. 50–61. (in Russ.)
10. **Levich V. G.** Physico-chemical hydrodynamics. Moscow, Fizmatgiz, 1959, 700 p. (in Russ.)
11. **Fuchs H., Legge H.** Flow of a water jet into vacuum. *Acta Astronautica*, 1979, vol. 6, pp. 1213–1226. DOI 10.1016/0094-5765(79)90066-3
12. **Lienhard J. H., Day J. B.** The breakup of superheated liquid jets. *ASME. J. Basic Eng.*, September 1970, vol. 92, pp. 515–521. DOI 10.1115/1.3425051
13. **Skripov V. P.** Metastable Liquid. Moscow, Nauka, 1972, 312 p. (in Russ.)
14. **Kurschat T. H., Chaves H., Meier G. E. A.** Complete adiabatic evaporation of highly superheated liquid jets, *J. Fluid Mech.*, 1992, vol. 236, p. 43. DOI 10.1017/S0022112092001332
15. **Simões-Moreira J. R., Angelo E., Vieira M. M.** Highly expanded flashing liquid jets. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2002, vol. 16, pp. 415–424. DOI 10.2514/2.6695
16. **Vieira M. M., Simões-Moreira J. R.** Low-pressure flashing mechanisms in iso-octane liquid jets. *J. Fluid Mech.*, 2007, vol. 572, pp. 121–144. DOI 10.1017/S0022112006003430
17. **Lu X. X., Li L., Luo K. H., Ren X. B., Liu Y., Yan X. F.** Investigation on the dispersal characteristics of liquid breakup in vacuum. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2015, vol. 30, pp. 1–8. DOI 10.2514/1.T4665
18. **Du W.-F., Li K., Wang Sh.-F., Zhao J.-F.** Flashing liquid jets in low-pressure environment. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2013, vol. 1, pp. 173–180. DOI 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2013007173
19. **Orme M., Muntz E. P., Legge H., Koppenwallner G.** Cavitation of liquid streams in a vacuum. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 1988, vol. 2, pp. 274–276. DOI 10.2514/3.97
20. **Gerasimov Yu. I., Yarygin V. N.** Flow of ideal and real gas jets from axisymmetric nozzles. Issues of Similarity 1. Flow of Jets in Vacuum. *Physical and Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2012, vol. 13, iss. 1. (in Russ.) URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-1/articles/295>
21. **Gerasimov Yu. I., Yarygin V. N.** Flow of ideal and real gas jets from axisymmetric nozzles. Issues of Similarity 2. Outflow into a Flooded Space. *Physical and Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2012, vol. 13, iss. 2. (in Russ.) URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-2/articles/315>
22. **Prihodko V. G., Chekmaryov S. F., Yarygin V. N., Yarygin I. V.** Supersonic gas outflow from a nozzle into vacuum with a liquid wall film: effect of film lifting on the outer surface of the nozzle against gravity. *Doklady RAN*, 2004, vol. 39, no. 5, pp. 618–620. (in Russ.)
23. **Yarygin V. N., Prihodko V. G., Yarygin I. V., Vyazov Yu. N.** Effect of physical properties of liquid on the outflow of the wall liquid film with the co-current gas flow from the nozzle into vacuum. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 5, pp. 651–653. DOI 10.1134/S0869864315050145
24. **Yarygin V. N., Prihodko V. G., Yarygin I. V., Gerasimov Yu. I., Krylov A. N., Skorovarov A. Yu.** Near-wall liquid film flows for space applications. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018, vol. 1105, 012079. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012079
25. **Prihodko V. G., Yarygin V. N., Yarygin I. V.** Experimental study of droplet detachment from liquid film surface by a co-current flow inside the nozzle stagnation chamber. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012148. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012148
26. **Prihodko V. G., Yarygin V. N., Yarygin I. V.** Control of droplet phase angular distribution under near-wall liquid film ejection with co-current gas flow from the supersonic nozzle into a vacuum. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012149. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012149
27. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Yaskin A. S., Khudozhnikov V. E., Gimelshein S. F.** Condensable supersonic jet facility for

- analyses of transient low-Temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2017, vol. 45, no. 5, pp. 819–827. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
28. **Yaskin A. S., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Dubrovin K. A., Khudozhitkov V. E.** Features of formation of a fluid flow flowing into a highly rarefied medium through a capillary. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012158. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012158
29. **Stabnikov V. N., Reuter I. M., Protsyuk T. B.** Ethanol. Moscow, 1976, 272 p. (in Russ.)
30. **Dyment O. N., Kazanskii K. S., Miroshnikov A. M.** Glycols and other derivatives of ethylene and propylene oxides. Ed. by O. N. Dyment. Moscow, Chemistry, 1976, 373 p. (in Russ.)
31. **Altschul A. D.** Hydraulic resistance. 2nd ed. Moscow, 1982, 224 p. (in Russ.)
32. **Pavlov P. A., Isaev O. A.** Barocapillary instability of free stream surface of superheated liquid. *TVT*, 1984, vol. 22, iss. 4, pp. 745–752. (in Russ.)

Информация об авторах

Александр Сергеевич Яскин, кандидат технических наук
Александр Евгеньевич Зарвин, кандидат физико-математических наук
Валерий Владимирович Каляда, ведущий электроник
Кирилл Алексеевич Дубровин, аспирант
Виталий Эдуардович Художитков, аспирант

Information about the Authors

Alexander S. Yaskin, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)
Alexandr E. Zarvin, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)
Valery V. Kalyada, Senior Electronics Engineer
Kirill A. Dubrovin, PhD Student
Vitaly E. Khudozhitkov, PhD Student

*Статья поступила в редакцию 17.05.2021;
одобрена после рецензирования 01.12.2021; принята к публикации 01.12.2021
The article was submitted 17.05.2021;
approved after reviewing 01.12.2021; accepted for publication 01.12.2021*