

03.1;03.5

Особенности истечения в вакуум микроструй невязкой жидкости

© А.С. Яскин¹, А.Е. Зарвин^{1,¶}, В.В. Каляда¹, К.А. Дубровин^{1,2}¹Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

¶ E-mail: zarvin@phys.nsu.ru

Поступило в Редакцию 28 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 26 июля 2021 г.

Принято к публикации 26 июля 2021 г.

Представлены экспериментальные результаты истечения микроструй этанола из капилляра (вертикальный поток в направлении силы тяжести) и из отверстия в стенке (в горизонтальном направлении). Показано, что длительное течение микроструи жидкости в вакууме обладает высокой степенью неустойчивости с внезапными изменениями направления, структуры, наблюдаемой плотности и существенно отличается от хорошо изученных режимов истечения в атмосферу, а также от кратковременных режимов истечения в вакуум. Описаны основные особенности течения и условия возникновения неустойчивости. Приведено вероятное объяснение причин разрушения микроструи.

Ключевые слова: микроструя жидкости, барокапиллярная неустойчивость течений, моделирование условий вакуума, этанол.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.21.51630.18846

Космическое пространство как среда низкого давления обуславливает технические возможности, основанные на явлении мгновенного испарения жидкости. Это обеспечивает уникальные характеристики и преимущества в открытом космосе систем позиционирования [1], подачи топлива [2], охлаждения и терморегуляции [3]. Одним из возможных решений при разработке двигателей ориентации и коррекции мини- и микроспутников нового поколения формата CubeSat [4,5] является использование жидкости, распыляемой из сопла в космическое пространство, для получения тяги. Истечение жидкости в разреженную среду (вакуум) сопровождается рядом особенностей, не встречающихся в плотных средах. Отсутствие аэродинамического сопротивления газа, окружающего струю в плотной среде, исключает силовое взаимодействие струи с окружающим газом, возмущающее течение и разрушающее струю.

Целью настоящей работы являются исследование процессов, происходящих при формировании микроструй маловязкой жидкости, при моделировании длительного течения микроструй жидкости в среду с контролируемой степенью разрежения, соответствующей открытому космосу, разреженным атмосферам планет, а также разработка техники и средств диагностики, необходимых для изучения процессов в этих условиях. Использована азеотропная смесь этанола (95.57 wt.%) с водой (4.43 wt.%), имеющая высокое давление насыщенных паров при температурах исследования. В настоящей работе состав атмосферы не варьировался.

Исследования выполнены на газодинамическом вакуумном стенде ЛЭМПУС-2 Новосибирского государственного университета. Подробное описание стенда приведено в [6], принципиальная схема измерений при истечении жидкости — в [7]. Наблюдение, фотографиро-

вание и видеозапись (черно-белая съемка) микроструи исследуемой жидкости в режиме непрерывного истечения из тонкого капилляра или малого отверстия в плоской стенке осуществлялись через оптические окна. Время регистрации установившегося течения жидкости составляло несколько минут и ограничивалось только программой эксперимента. Освещение рабочего участка и струи жидкости внутри камеры осуществлялось равномерным источником света. Область наблюдения как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении превышала 0.3 м.

Исходная температура жидкости T_0 контролировалась с погрешностью, не превышающей 0.1 К. Перепад давления ΔP_0 определялся как разность давления P_0 над жидкостью, измеряемого мановакуумметром, и остаточным давлением P_b в вакуумной камере, измеряемым вакуумметром. Для исследования истечения струй в среду с атмосферным давлением вакуумная камера наполнялась газом, а в сосуде с жидкостью создавалось избыточное над атмосферой давление компрессором. Для реализации режимов течения жидкости в вакуум при перепадах давления < 100 кПа сосуд с жидкостью подсоединялся к независимой системе вакуумной откачки. Измерения непрерывного установившегося течения жидкости проводились при горизонтальном истечении из отверстия диаметром $d_a = 120, 170, 290 \mu\text{m}$ и вертикальном истечении (сверху вниз) из тонкого капилляра с внутренним диаметром $d_a = 400 \mu\text{m}$ и удлинением $L/d_a = 63$.

Физические величины, характеризующие режимы вертикальных микроструй этанола, приведены в таблице. Значения коэффициентов поверхностного натяжения σ и динамической вязкости μ , а также давления насыщенных паров P_s этанола на кривой фазового равновесия взяты

Режимы истечения из капилляра вертикальных микроструй этанола

Номер режима	T_0 , К	σ , мПа · м	μ , мПа · с	P_s , кПа	P_b , Па	N_s	T_s , К	ΔT_s , К	ΔP_0 , кПа
1	295	22	1.16	5.81	10^5	0.06	295	0	100
2	295	22	1.16	5.81	10^5	0.06	295	0	20
3	295	22	1.16	5.81	600	9.68	262	33	100
4	295	22	1.16	5.81	600	9.68	262	33	20
5	295	22	1.16	5.81	2	2905	201	94	100
6	295	22	1.16	5.81	1	5810	196	99	20

из справочников и ГОСТа [8]. Для оценки степени перегрева этанола (глубины захода в метастабильную область) использовались как абсолютные, так и относительные параметры: по давлению — $N_s = P_s/P_b$ [9], по температуре — $\Delta T_s = T_0 - T_s$ [10].

Фотографии струй этанола для отдельных режимов из таблицы показаны на рис. 1. В верхней части фотографий по центру видно светлое изображение конца капилляра. Фотографии приведены в разном масштабе из соображений иллюстративной наглядности. В левом

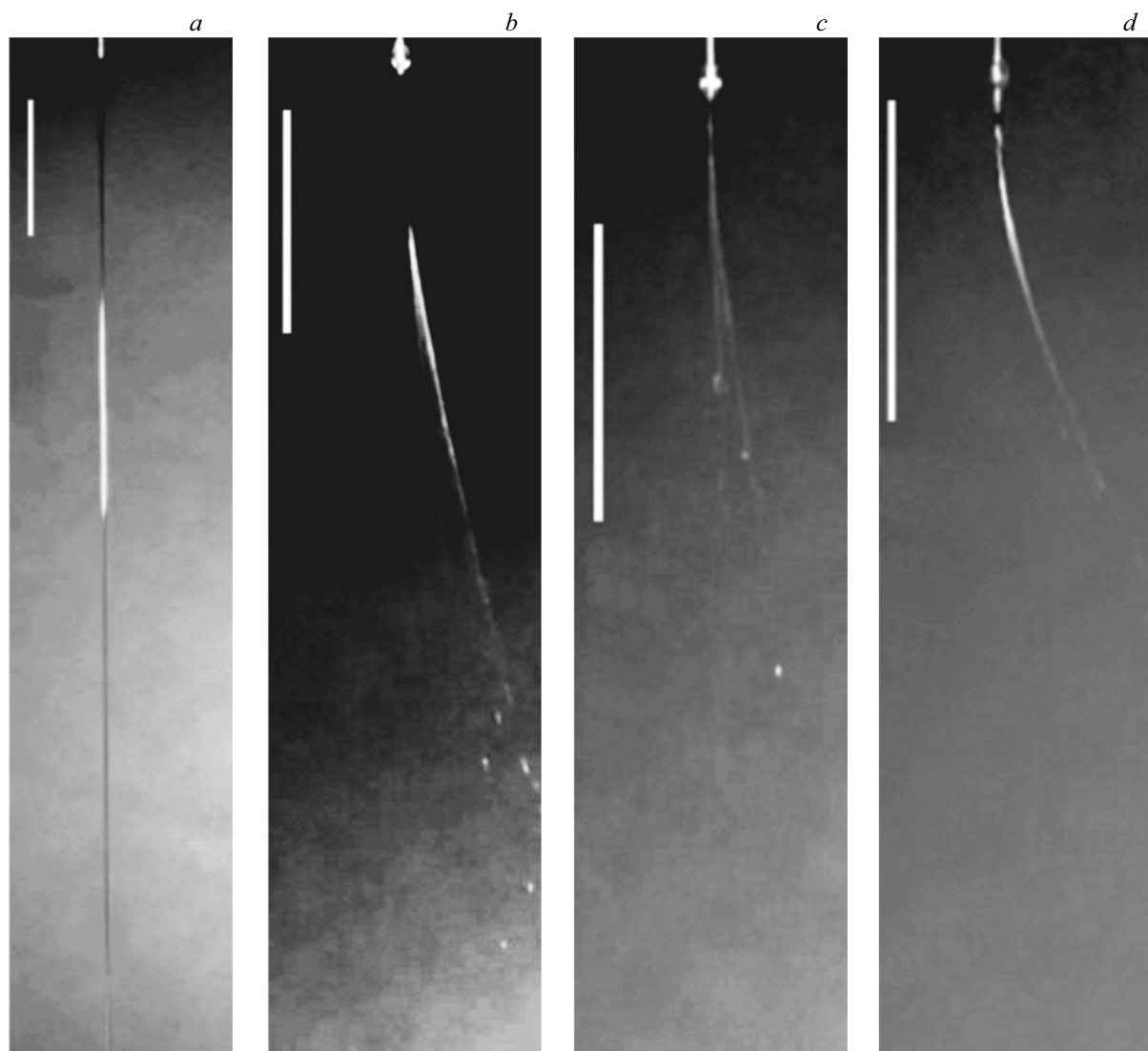


Рис. 1. Микроструи этанола, истечение из капилляра: *a* — в атмосферу, режим 1; *b* — в вакуум при перепаде $\Delta P_0 = 100$ кПа, режим 3; *c, d* — в вакуум при перепаде $\Delta P_0 = 20$ кПа, режимы 4 и 6 соответственно.

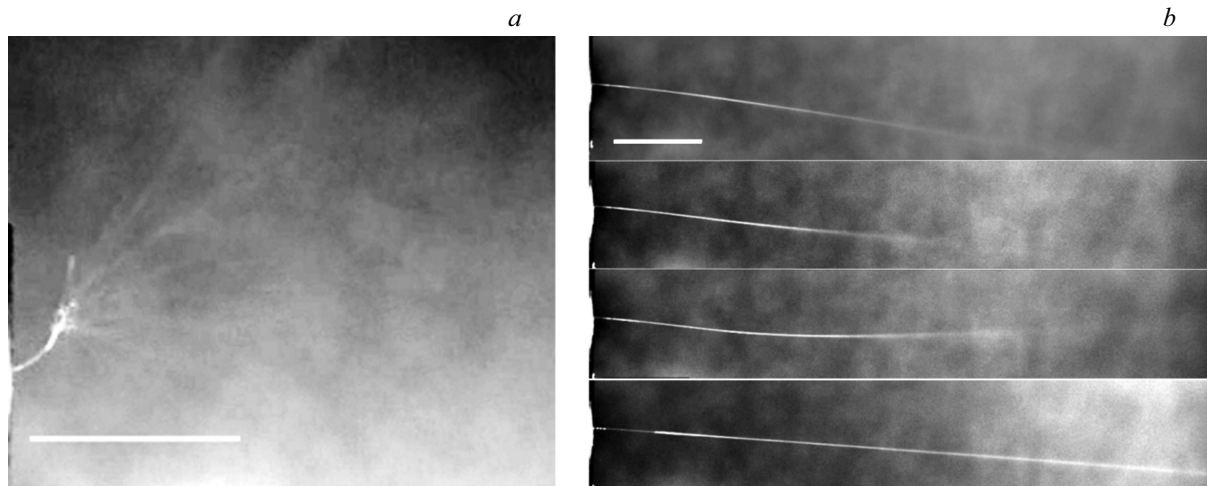


Рис. 2. Горизонтальное истечение этанола из отверстия диаметром $d_a = 120 \mu\text{m}$ при $T = 295 \text{ K}$. a — $\Delta P_0 = 16 \text{ kPa}$, $P_b = 0.4 \text{ Pa}$; b — $\Delta P_0 = 100 \text{ kPa}$, $P_b = 1 \text{ Pa}$ (микроструя в последовательно выбранные моменты времени).

углу верхней части фотографий приведен масштабный отрезок фиксированной длины (20 mm), позволяющий оценить размеры различных участков струй. Микроструя на снимках наблюдается от выходного отверстия сопла в виде узкого длинного темного (почти черного) цилиндра, на некотором расстоянии достаточно резко становящегося светлым. Фотографии выбраны из видеоряда записей при скорости съемки 30 fps. Время записи позволило регистрировать стационарные периоды течения и их внезапную смену при поддержании неизменными давления и температуры. Ограничения по числу рисунков и фрагментов не позволяют привести большое количество разнообразных форм нестационарных течений. На рис. 1, $a-d$ приведены фотографии микроструй, выполненные в режимах 1, 3, 4 и 6 соответственно (см. таблицу). В отличие от истечения в атмосферу (рис. 1, a) истечение микроструй в вакуум (рис. 1, $b-d$) характеризуется спонтанными изменениями формы и характера течения. Как следует из анализа полученных результатов, неустойчивость микроструй возрастает с понижением перепада давления над жидкостью и давления в камере истечения. Общей тенденцией является образование криволинейных струй. Наличие гетерогенных центров зародышеобразования способствует „взрывному“ вскипанию микроструи вниз по потоку с образованием конусообразной парожидкостной струи с углами раскрытия до 60° , зависящими от перепада давления на сопле.

Горизонтальные микроструи, исследованные в работе, моделировали истечение жидкости в вакуум через малое отверстие (рис. 2). Как показали эксперименты, горизонтальные микроструи характеризуются более значительной неустойчивостью и разнообразием криволинейных форм. Вскипание или разбрызгивание, 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 парогазовой фазы носит спонтанный характер. При малом перепаде давления (рис. 2, a) горизонтальная микроструя при истечении может внезапно изгибаться резко вверх. 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° .

Спонтанное изменение направления и формы микроструи из отверстия диаметром $120 \mu\text{m}$ в процессе ее истечения при перепаде давления на отверстии 100 kPa показано на рис. 2, b в последовательные (сверху вниз) отрезки времени. Молекулярные силы, действующие в струе, столь значительны, что результат их действия превышает действие гравитационных сил, вызывая изменения направлений течения микроструи, не согласующиеся с формой течения в гравитационном поле. Изменение направления течения нельзя объяснить особенностями записи изображения. Форма течения, приведенная на каждой из фотографий, стабильна в течение некоторого (неодинакового) промежутка времени, причем процесс изменения происходит практически мгновенно. Отметим, что, как правило, резкие изменения направленности и формы струи происходили после внезапного возникновения короткого участка более яркого свечения, наблюдавшегося при изучении видеозаписи.

Можно предположить, что наблюдаемые изменения формы микроструй обусловлены интенсивным испарением с поверхности струи перегретого этанола и реактивным действием образующегося пара. Объяснение наблюдаемых форм возможно в рамках модели барокапиллярной неустойчивости течений, описанной в [11,12]. Согласно этой модели, разрушение течения вызвано испарением перегретой жидкости преимущественно из

углублений поверхности, возникающих вследствие капиллярной неустойчивости. Появление углублений на поверхности 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. Возможно схлопывание поверхностных каверн перегретого потока реактивным действием на их поверхность испарившейся жидкости. С понижением перепада давления струя укорачивается, растет ее неустойчивость, микроструя переходит в распыленную на меньшем удалении от сопла.

Таким образом, при длительном истечении микроструй жидкости в вакуум (сильно разреженную среду) обнаружены отличия в процессах истечения как из отверстия, так и из длинного капилляра от имеющихся в литературе результатов [9,13–15]. Прежде всего это крайняя неустойчивость форм течения, относительно стабильных при измерениях за очень короткие промежутки времени. Также показана возможность моделирования сложных процессов истечения микрожидкостей в пространство с заданной разреженной атмосферой на компактном вакуумном газодинамическом стенде.

Финансирование работы

Работа выполнена на оборудовании ЦКП „Прикладная физика“ НГУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSUS-2020-0039) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-01-00332).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Joslyn, A. Ketsdever, in *46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit* (Nashville, TN, 2010), AIAA 2010-6966. DOI: 10.2514/6.2010-6966
- [2] А.В. Корольков, В.Б. Сапожников, *Обозрение прикладной и промышленной математики*, **23** (4), 363 (2016). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37299171>
- [3] С.С. Раубе, Е.К. Красночуб, В.М. Бронштейн, *Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, **9** (2), 50 (2010). DOI: 10.18287/2541-7533-2010-0-2(22)-50-61
- [4] C. Nieto-Peroy, M.R. Emami, *Appl. Sci.*, **9** (15), 3110 (2019). DOI: 10.3390/app9153110
- [5] H. Heidt, J. Puig-Suari, A.S. Moore, S. Nakasuka, R.J. Twiggs, in *14th Annual/USU Conf. on small satellites* (2000), SSC00-V-5. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2069&context=smallsat>
- [6] A.E. Zarvin, V.V. Kalyada, V.Zh. Madirbaev, N.G. Korobeishchikov, M.D. Khodakov, A.S. Yaskin, V.E. Khudozhitkov, S.F. Gimelshein, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **45** (5), 819 (2017). DOI: 10.1109/TPS.2017.2682901
- [7] A.S. Yaskin, A.E. Zarvin, V.V. Kalyada, K.A. Dubrovин, V.E. Khudozhitkov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1677**, 12158 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1677/1/012158
- [8] *Стандартные справочные данные. Этанол жидкий и газообразный*, ГОСТ Р 8.991–2020 (Стандартинформ, М., 2020). docs.cntd.ru/document/1200173640
- [9] J. Simões-Moreira, M.M. Vieira, E. Angelo, *J. Thermophys. Heat Transfer*, **16** (3), 415 (2002). DOI: 10.2514/2.6695
- [10] J.H. Lienhard, J.B. Day, *J. Fluids Eng.*, **92** (3), 515 (1970). DOI: 10.1115/1.3425051
- [11] В.П. Скрипов, *Метастабильная жидкость* (Наука, М., 1972). <http://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=106987>
- [12] П.А. Павлов, О.А. Исаев, *ТВТ*, **22** (4), 745 (1984). <http://energy.ihed.ras.ru/arhive/article/5905>
- [13] M.M. Vieira, J.R. Simões-Moreira, *J. Fluid Mech.*, **572**, 121 (2007). DOI: 10.1017/S0022112006003430
- [14] X. Lu, I. Li, K. Luo, X. Ren, Y. Liu, X. Yan, *J. Thermophys. Heat Transfer*, **30** (2), 410 (2016). DOI: 10.2514/1.T4665
- [15] W.-F. Du, K. Li, S. Wang, J.-F. Zhao, *Interfac. Phenom. Heat Transfer*, **1** (2), 173 (2013). DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2013007173