

Научная статья

УДК 532.522.2

doi: 10.17223/19988621/92/6

Экспериментальное исследование распада вертикальной жидкой струи

**Владимир Афанасьевич Архипов¹, Сергей Александрович Басалаев²,
Ксения Григорьевна Перфильева³, Сергей Николаевич Поленчук⁴,
Владимир Иванович Романдин⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ leva@niipmm.tsu.ru

² tarm@niipmm.tsu.ru

³ k.g.perfiljeva@yandex.ru

⁴ perzh.polenchuk@mail.ru

⁵ romandin@niipmm.tsu.ru

Аннотация. Представлены методика и результаты экспериментального исследования капиллярного распада вертикальной жидкой струи, свободно истекающей через сопло из сосуда Мариотта. Определена качественная картина распада струи на капли в зависимости от ее начального диаметра. Получены зависимости длины сплошного участка струи от начальных значений ее диаметра и скорости, а также от вязкости и коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Ключевые слова: вертикальная струя жидкости, распад струи на капли, капиллярный режим, длина сплошного участка струи, вязкость и коэффициент поверхностного натяжения жидкости, экспериментальное исследование

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307, <https://rscf.ru/project/22-19-00307/>

Для цитирования: Архипов В.А., Басалаев С.А., Перфильева К.Г., Поленчук С.Н., Романдин В.И. Экспериментальное исследование распада вертикальной жидкой струи // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 92. С. 69–78. doi: 10.17223/19988621/92/6

Original article

Experimental study of the breakup of vertical liquid jet

**Vladimir A. Arkhipov¹, Sergey A. Basalaev², Ksenia G. Perfiljeva³,
Sergey N. Polenchuk⁴, Vladimir I. Romandin⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ leva@niipmm.tsu.ru

² tarm@niipmm.tsu.ru

³ k.g.perfiljeva@yandex.ru⁴ perzh.polenchuk@mail.ru⁵ romandin@niipmm.tsu.ru

Abstract. The experimental study results of the breakup of a vertical liquid jet freely flowing through nozzle from vessel are presented. A qualitative picture of the breakup jet into drops at the its varying diameter and initial velocity has been obtained. The results of measuring the length of the continuous area of the liquid jet by the visualization method depending on the initial values of its diameter and flow rate as well as on the fluid characteristics have been obtained. It has been experimentally determined that the length of the continuous area of the jet monotonically increases with an increase in its initial diameter for all studied types of liquids. The length of the continuous area of the jet also increases for all the liquids studied with an increase in the initial velocity of liquid flow from the nozzle. A decrease in the surface tension coefficient due to the introduction of surfactant leads to an increase in the length of the continuous area of the jet compared to distilled water. An increase in the viscosity of the liquid due to the use of a water-glycerin solution leads to an increase in the length of the continuous area of the jet.

Keywords: vertical liquid jet, jet breakup into drops, capillary regime, length of continuous section of jet, viscosity and surface tension coefficient of liquid, experimental study

Acknowledgments: This study was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 22-19-00307), <https://rscf.ru/project/22-19-00307/>

For citation: Arkhipov, V.A., Basalaev, S.A., Perfilieva, K.G., Polenchuk, S.N., Romandin, V.I. (2024) Experimental study of the breakup of vertical liquid jet. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 92. pp. 69–78. doi: 10.17223/19988621/92/6

Введение

Распад струи жидкости, истекающей из сопла, является одной из классических задач капиллярной гидродинамики [1], интерес к которой не снижается до настоящего времени [2]. Процессы каплеобразования при диспергировании жидких струй играют важную роль в целом ряде технических приложений. В качестве примеров можно привести распыливание жидких топлив в камерах сгорания двигательных установок, струйные принтеры и установки для 3D-печати, системы орошения в сельском хозяйстве, наземные и авиационные технологии тушения пожаров. Для обеспечения требуемых характеристик распыла, в частности длины сплошного участка струи и размеров образующихся капель, необходимо проведение детальных экспериментальных исследований, позволяющих оптимизировать процесс диспергирования для конкретной задачи.

Одной из актуальных задач является оптимизация на основе математического и физического моделирования процесса сброса жидкого хладагента с борта летательного аппарата при авиационном тушении пожаров. Для верификации разрабатываемых математических моделей и программных комплексов расчета соответствующих процессов перспективным и экономически целесообразным является применение беспилотных летательных аппаратов с модельным сливным устройством (МСУ) [3]. При выборе конструкции и режимных рабочих параметров МСУ необходимо знать особенности динамики диспергирования жидкости при ее сбросе и свободном падении в виде макрообъема [4] или струи.

В настоящей работе представлены методика и результаты экспериментального исследования распада вертикальной жидкой струи, свободно истекающей из сосуда через сопло. При малых скоростях движения струи по отношению к газу ее распад происходит под действием капиллярных сил [1]. Рассмотрен капиллярный режим распада струи жидкости, для которого определены качественная картина процесса и зависимость длины сплошного участка струи от начальных значений ее диаметра и скорости, а также от вязкости и коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Методика экспериментального исследования

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для получения вертикальной струи жидкости с постоянным и контролируемым значением начальной скорости использовался сосуд Мариотта, состоящий из замкнутой емкости 1 с исследуемой жидкостью и открытой с обоих концов трубки 2, введенной в верхнюю часть емкости 1 через герметичную пробку 3. Верхний конец трубки 2 сообщается с атмосферой, а нижний помещен в исследуемую жидкость. Высота h показана на рисунке.

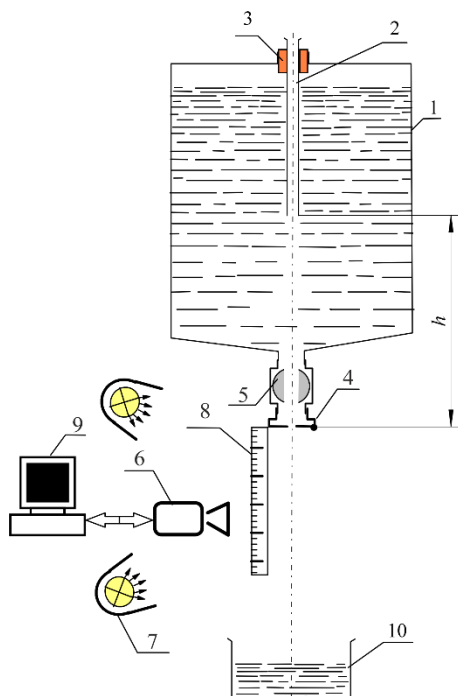


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – замкнутая емкость; 2 – трубка; 3 – герметичная пробка; 4 – диафрагма с калиброванным соплом; 5 – запорный вентиль; 6 – камера машинного зрения; 7 – система подсветки; 8 – масштабная линейка; 9 – компьютер; 10 – приемная емкость

Fig. 1. Experimental setup diagram:

- (1) closed container; (2) tube; (3) sealed plug; (4) diaphragm with calibrated nozzle; (5) shut-off valve; (6) machine vision camera; (7) illumination system; (8) scale; (9) computer; and (10) receiving container

Истечение жидкости происходит через калиброванное сопло заданного диаметра в диафрагме 4, расположенной в нижней части емкости 1, при открытии запорного вентиля 5. Начальная скорость истечения изменялась вертикальным перемещением трубки 2 и определялась по формуле Торричелли

$$u_0 = \sqrt{2gh}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; h – расстояние от нижнего конца трубки 2 до диафрагмы 4.

Для определения качественной картины истечения и длины сплошного участка струи жидкости использовалась высокоскоростная визуализация. Регистрация изображения проводилась камерой машинного зрения типа MER2-502-79U3C с темпом съемки 300 кадров в секунду.

Для фоновой засветки объекта использовалась специальная система 7, включающая осветительную панель с пятью вмонтированными светодиодами матрицами мощностью 10 Вт, обеспечивающими получение контрастных видеокадров. Размеры струи в вертикальном направлении контролировали с помощью масштабной линейки 8. Обработка видеокадров для определения длины сплошного участка струи до ее разрушения на капли проводилась с помощью компьютера 9 путем обработки видеокадров по программе CorelDRAW с погрешностью ~ 4%.

В качестве дополнительного способа оценки длины сплошного участка струи жидкости использовался электроконтактный метод, основанный на изменении электропроводности струи при ее деформации (утонении) или разрыве электрической цепи при полном нарушении сплошности струи, связанным с образованием индивидуальных капель.

Результаты исследований и их анализ

Эксперименты проводились для дистиллированной воды, дистиллированной воды с добавлением ~ 0.1 мас. % поверхностно-активного вещества (ПАВ) и водно-глицеринового раствора с соотношением объемов 1:1. В качестве ПАВ использовали синтанол АЛМ-10. Для снижения погрешности определения коэффициентов поверхностного натяжения σ и динамической вязкости μ жидкости их измерения проводились до и после эксперимента. Коэффициент поверхностного натяжения измерялся статическим методом с использованием тензиметра K6 KRUSS с относительной погрешностью ~ 0.25%, коэффициент динамической вязкости водно-глицеринового раствора определялся по измеренной скорости стационарного осаждения u алюминиевого шарика диаметром $D = 1.3$ мм в стоксовском режиме:

$$\mu = \frac{gD^2(\rho_p - \rho)}{18u}, \quad (2)$$

где ρ_p , ρ – плотность материала шарика и водно-глицеринового раствора соответственно.

Измеренные значения физических характеристик исследованных жидкостей, а также их справочные данные [5] представлены в табл. 1.

В ходе экспериментального исследования длины сплошного участка струи варьировали ее начальный диаметр за счет изменения диаметра сопла диафрагмы 4 в диапазоне $d = (2.0 \div 5.0)$ мм, а также начальную скорость струи в диапазоне $u_0 = (2.7 \div 3.4)$ м/с за счет изменения расстояния h (рис. 1).

Таблица 1

Физические характеристики исследуемых жидкостей

	Жидкость	ρ , кг/м ³	μ , Па·с	σ , Н/м
I	Вода	998	10^{-3}	0.0727
II	Вода + ПАВ	998	10^{-3}	0.0376
III	Вода + глицерин	1 128	$6 \cdot 10^{-3}$	0.0631

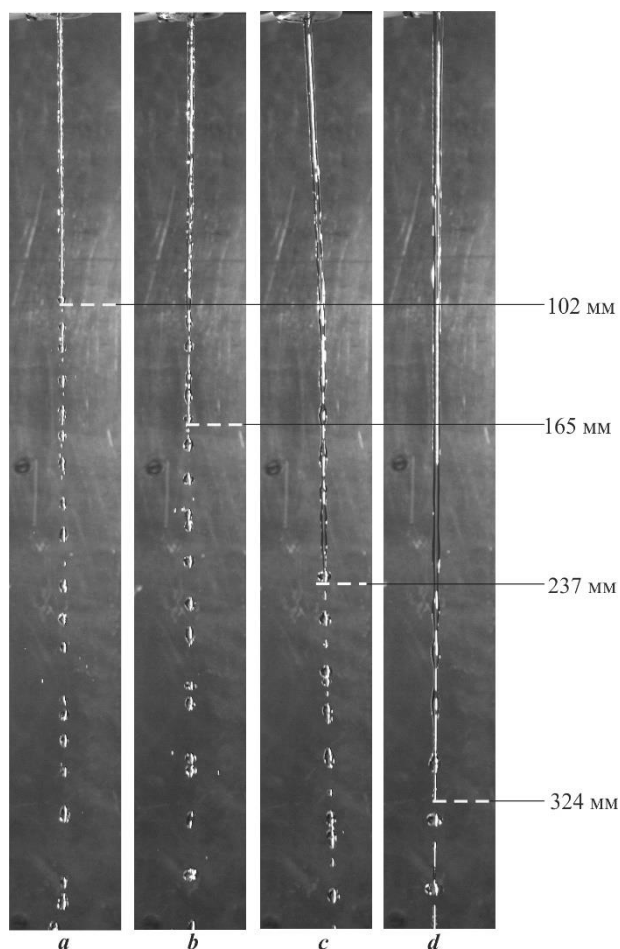


Рис. 2. Качественная картина процесса распада струи дистиллированной воды ($u_0 = 2.7$ м/с) для разных значений ее начального диаметра: $d = 2$ мм (a); $d = 3$ мм (b); $d = 4$ мм (c); $d = 5$ мм (d)

Fig. 2. Qualitative picture of the process of the distilled water jet breakup ($u_0 = 2.7$ м/с) for different values of its initial diameter: $d =$ (a) 2; (b) 3 (c) 4; and (d) 5 mm

Качественная картина истечения струи подобна для всех исследованных жидкостей. В качестве примера на рис. 2 представлены видеокadres истечения струи дистиллированной воды для значения начальной скорости $u_0 = 2.7$ м/с при варьировании диаметра струи от 2 до 5 мм. Пунктиром на рис. 2 показаны значения длины сплошного участка струи. Из приведенных видеокadres на рис. 2 следует,

что истекающая струя включает три участка – сплошной участок длиной l ; переходный участок, характеризующийся образованием связанных тонкими перемычками капель, и участок движения индивидуальных капель. Диаметр капель, образующихся на переходном участке, соответствует начальному диаметру струи. На участке движения индивидуальных капель они приобретают форму сплюснутого сфероида. Отметим, что наличие трех характерных участков по длине струи было обнаружено и электроконтактным методом. В частности, на переходном участке были обнаружены пульсации тока на экране осциллографа, связанные с изменением электропроводности струи при ее деформации.

Результаты измерения длины сплошного участка струи жидкости методом визуализации в зависимости от начальных значений ее диаметра и скорости истечения, осредненные по результатам обработки $(30 \div 80)$ видеок кадров, представлены в табл. 2 и на рис. 3 для дистиллированной воды (жидкость I, рис. 3, *a*), дистиллированной воды с добавкой ПАВ (жидкость II, рис. 3, *b*) и водно-глицеринового раствора (жидкость III, рис. 3, *c*). Результаты определения длины сплошного участка дополнительным электроконтактным методом, проведенные для воды, согласуются с результатами основной методики в пределах 10%.

Таблица 2

Результаты измерений длины сплошного участка струи

Жидкость	u_0 , м/с	l , мм			
		$d = 2$ мм	$d = 3$ мм	$d = 4$ мм	$d = 5$ мм
I	2.7	102 ± 5	165 ± 7	237 ± 7	320 ± 10
	3.1	117 ± 5	179 ± 5	260 ± 7	350 ± 10
	3.4	131 ± 6	200 ± 7	280 ± 7	370 ± 10
II	2.7	148 ± 5	258 ± 7	368 ± 8	620 ± 10
	3.1	165 ± 6	298 ± 8	395 ± 8	640 ± 8
	3.4	168 ± 8	316 ± 7	450 ± 10	660 ± 10
III	2.7	218 ± 5	352 ± 5	500 ± 8	600 ± 10
	3.1	250 ± 5	372 ± 7	525 ± 8	650 ± 10
	3.4	280 ± 5	394 ± 8	548 ± 8	710 ± 10

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, показывает, что длина сплошного участка струи монотонно увеличивается с увеличением ее начального диаметра в ~ 3 раза (жидкость I), в ~ 4 раза (жидкость II) и в ~ 2.6 раза (жидкость III). При повышении начальной скорости истечения жидкости из сопла также происходит увеличение длины сплошного участка струи для всех исследованных жидкостей на $\sim (7 \div 30)\%$.

Снижение коэффициента поверхностного натяжения за счет введения ПАВ (см. рис. 3, *b*) приводит к увеличению длины сплошного участка струи по сравнению с дистиллированной водой на $\sim (30 \div 90)\%$.

Увеличение вязкости жидкости до $6 \cdot 10^{-3}$ Па·с (водно-глицериновый раствор) приводит к увеличению длины сплошного участка струи в ~ 2 раза.

На рис. 3 (линии 1, 2, 3) и в табл. 3 представлены результаты расчетов длины сплошного участка струи жидкости по формуле В.Г. Левича [1] для режима капиллярного распада при осесимметричных возмущениях ее поверхности

$$l = 8.46 \cdot u_0 \sqrt{\frac{\rho d^3}{8\sigma}}. \quad (3)$$

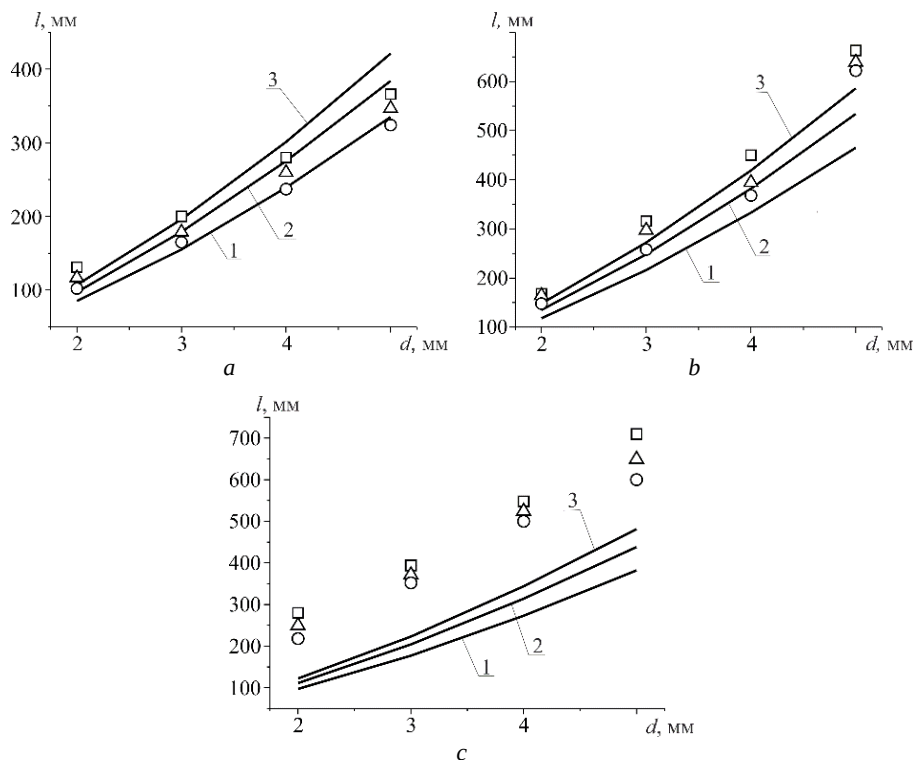


Рис. 3. Зависимость длины сплошного участка струи от диаметра сопла для дистиллированной воды (а), дистиллированной воды с добавлением ПАВ (б) и водно-глицеринового раствора (с): линии 1, 2, 3 – расчеты по формуле (3) для значений начальной скорости струи 2.7, 3.1 и 3.4 м/с соответственно; точки на графиках – экспериментальные данные для $u_0 = 2.7$ м/с ($\circ$), $u_0 = 3.1$ м/с (Δ), $u_0 = 3.4$ м/с ($\square$)

Fig. 3. Dependence of the length of the continuous section of the jet on the nozzle diameter for (a) distilled water, (b) distilled water with surfactant, and (c) water-glycerin solution: lines 1, 2, 3, calculations using formula (3) for the value of initial jet velocity 2.7, 3.1, and 3.4 m/s, respectively; points on the graphs are experimental data for $u_0 = 2.7$ ($\circ$), 3.1 (Δ), and 3.4 m/s ($\square$)

Таблица 3

Результаты расчетов длины сплошного участка струи по формуле (3)

Жидкость	u_0 , м/с	l , мм			
		$d = 2$ мм	$d = 3$ мм	$d = 4$ мм	$d = 5$ мм
I	2.7	85	155	239	335
	3.1	97	179	275	384
	3.4	107	196	301	421
II	2.7	118	216	333	465
	3.1	135	248	382	534
	3.4	148	272	419	586
III	2.7	97	177	273	382
	3.1	111	204	314	438
	3.4	122	223	344	481

Дополнительно проведен расчет длины сплошного участка струи жидкости по формуле В.Г. Левича [1] для аэродинамического режима дробления

$$l = 15d. \quad (4)$$

Полученные значения l не зависят от начальной скорости струи и типа жидкости; при увеличении начального диаметра струи от 2 до 5 мм длина ее сплошного участка монотонно увеличивается от 30 до 75 мм. Полученные значения l кратно отличаются от измеренных, что свидетельствует о капиллярном режиме распада струи в проведенных экспериментах. Это подтверждается расчетами числа Вебера

$$We = \frac{\rho_g du_0^2}{\sigma}, \quad (5)$$

где ρ_g – плотность окружающего воздуха.

Для исследованного диапазона параметров расчетом по формуле (5) получены значения $We = (0.2 \div 1.8)$. Отметим, что воздействие окружающего газа на развитие капиллярных возмущений и распад струи проявляется при $We > 5.3$ [6].

Заключение

1. Получена качественная картина распада вертикальной струи жидкости на капли при варьировании ее диаметра от 2 до 5 мм и начальной скорости от 2.7 до 3.4 м/с. Показано, что для трех исследованных жидкостей (дистиллированная вода, дистиллированная вода с добавкой ПАВ, водно-глицериновый раствор) структура струи идентична и включает три участка – сплошной участок длиной l ; переходный участок, характеризующийся образованием связанных тонкими перемычками капель, и участок движения индивидуальных капель.

2. Экспериментально определено, что длина сплошного участка струи монотонно увеличивается с увеличением ее начального диаметра в ~ 3 раза (дистиллированная вода), в ~ 4 раза (дистиллированная вода с добавкой ПАВ) и в ~ 2.6 раза (водно-глицериновый раствор).

3. Показано, что повышение начальной скорости струи жидкости приводит к увеличению длины ее сплошного участка для всех исследуемых жидкостей на $\sim (7 \div 30)\%$.

4. Показано, что снижение коэффициента поверхностного натяжения жидкости за счет введения ПАВ в ~ 2 раза приводит к увеличению длины сплошного участка струи на $\sim (30 \div 90)\%$.

5. Показано, что увеличение коэффициента динамической вязкости жидкости от 10^{-3} до $6 \cdot 10^{-3}$ Па·с приводит к увеличению длины сплошного участка струи в ~ 2 раза.

Список источников

1. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М. : Физматгиз, 1959.
2. Рябов М.Н., Гобызов О.А., Абдрахманов Р.Х., Бильский А.В. Экспериментальное исследование истечения и дробления двухфазной коаксиальной микроструи // Прикладная механика и техническая физика. 2024. Т. 61, № 1. С. 11–22. doi: 10.15372/PMTF202315353
3. Чадин Ю.М., Марунченко Л.Ю., Костюшин К.В., Петров Д.С., Юстус А.В. Разработка экспериментальной БАС для моделирования сброса хладагента при тушении пожаров // Беспилотные аппараты «БПЛА-2024» : сб. ст. Междунар. молодежного форума.

Минск, 22–26 апреля 2024 г. / Белорус. гос. технолог. ун-т.; отв. за изд. И.В. Войтов.
Минск : БГТУ, 2024. С. 66–70.

4. Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Влияние поверхностного натяжения на разрушение макрообъема жидкости при его свободном падении // Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46, № 3. С. 31–34. doi: 10.21883/PJTF.2020.03.48989.17970
5. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий справочник химика. Л. : Химия, 1978.
6. Бондарева Н.В., Григорьев А.Л., Коровин Т.Г., Коротеев А.А., Сафронов А.А., Skorobogatko T.D., Хлынов А.В. Экспериментальное исследование влияния числа Онезорге на размеры капель, образовавшихся в результате капиллярного распада струи // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 5. С. 773–777.

References

1. Levich V.G. (1959). *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physicochemical hydrodynamics]. Moscow: Fizmatgiz.
2. Ryabov M.N., Gobyzov O.A., Abdrakhmanov R.Kh., Bilsky A.V. (2024) Experimental study of the flow and breakup of a two-phase coaxial micro jet. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 65(1). pp. 7–17. DOI: 10.1134/S0021894424010024.
3. Chadin Yu.M., Marunchenko L.Yu., Kostyushin K.V., Petrov D.S., Yustus A.V. (2024). *Razrabotka eksperimental'noy BAS dlya modelirovaniya sbrosa khladagenta pri tushenii pozharov* [Development of an experimental UAS for simulating refrigerant discharge during fire extinguishing]. Unmanned aerial vehicles "UAV-2024": *Coll. Art. of the International Youth Forum. Minsk, April 22-26, 2024 / Belarusian State Technological University. Minsk: BSTU*. pp. 66–70.
4. Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Zolotorev N.N., Perfiljeva K.G., Usanina A.S. (2020) The surface tension effect on macrovolume destruction of a liquid during its free fall. *Technical Physics Letters*. 46. pp. 130–133. DOI: 10.1134/S1063785020020030.
5. Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. (1978) *Kratkiy spravochnik khimika* [A brief handbook of a chemist]. Leningrad: Chemistry.
6. Bondareva N.V., Grigoriev A.L., Korovin T.G., Koroteev A.A., Safronov A.A., Skorobogatko T.D., Khlynov A.V. (2019) Experimental study of the Ohnesorge number effect on the size of droplets formed as a result of the jet capillary breakup. *Thermophysics and Aeromechanics*. 26. pp. 723–727. DOI: 10.1134/S0869864319050093.

Сведения об авторах:

Архипов Владимир Афанасьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом газовой динамики и физики взрыва Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Басалаев Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Перфильева Ксения Григорьевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Поленчук Сергей Николаевич – техник I категории Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: perzh.polenchuk@mail.ru

Романдин Владимир Иванович – научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: romandin@niipmm.tsu.ru

Information about the authors:

Arkhipov Vladimir A. (Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Basalaev Sergey A. (Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Perfilieva Ksenia G. (Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Polencuk Sergey N. (Technician Ist Category of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: perzh.polenchuk@mail.ru

Romandin Vladimir I. (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: romandin@niipmm.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; принята к публикации 09.12.2024

The article was submitted 29.10.2024; accepted for publication 09.12.2024