

УДК 532.6

## МОСТИКОВЫЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ В МИКРОКАНАЛАХ

© 2021 г. Ф. В. Роншин<sup>1,\*</sup>, Е. А. Чиннов<sup>1</sup>, Ю. А. Дементьев<sup>1</sup>, О. А. Кабов<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН С.В. Алексеенко 28.05.2021 г.

Поступило 28.05.2021 г.

После доработки 28.05.2021 г.

Принято к публикации 03.06.2021 г.

В результате исследований двухфазных потоков в щелевых микроканалах обнаружен и изучен новый режим течения – мостиковый. Мостики представляют собой вертикальные переемычки между пленками жидкости, расположенными на нижней и верхней сторонах канала. Установлено, что с увеличением расходов газа и жидкости мостики начинают деформироваться, а затем разрушаться. Определены критические числа Вебера, характерные для деформации и разрушения жидкостных мостиков. Предложена новая классификация режимов двухфазного течения в микроканалах на основе полученных экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* мостиковый режим течения, плоский микроканал, двухфазный поток

DOI: 10.31857/S2686740021040118

В настоящее время разрабатывается значительное количество микрофлюидных устройств: датчики расхода, клапаны, системы обработки жидкостей для химического анализа, насосы, разделительные и смешивающие каналы, детекторы химических веществ. Устройства микрофлюидики создаются для генерации и контроля монодисперсных капель и пузырьков. Данная область является одной из наиболее быстроразвивающихся благодаря широкому применению в биологии [1, 2], химии [3] и нанотехнологиях [4, 5]. Кроме того, в настоящее время происходит миниатюризация теплообменных устройств, вследствие чего микроканальные системы охлаждения получают широкое применение благодаря высокой эффективности [6].

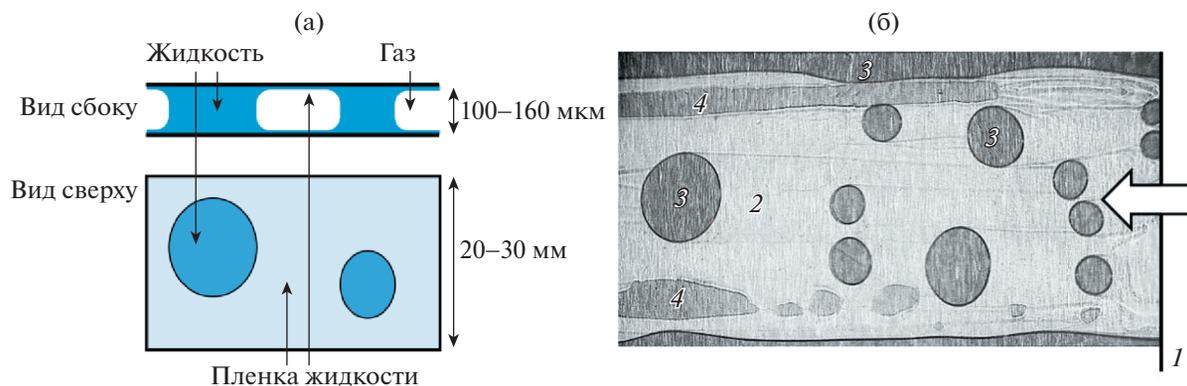
Обзор работ по исследованию двухфазного течения в микроканальных системах представлен в [7, 8]. Показано, что в микроканальных системах капиллярные силы оказывают существенное влияние на двухфазное течение, появляются новые режимы и неустойчивости. В работе [9] показано, что с уменьшением размеров канала наблюдается тенденция образования капель в каналах. Детальный обзор работ по динамике капель в различных условиях в двухфазных системах недавно опубликован в [10]. В трубах диаметром более 1 мм при высоких скоростях газа (более 10 м/с) капли формируются

при переходе от кольцевого режима к дисперсно-кольцевому. С уменьшением размеров каналов капли начинают формироваться и при меньших скоростях вследствие преобладания капиллярных сил. В плоских микроканалах обнаружен режим, в котором наблюдаются вертикальные мостики жидкости между верхней и нижней стенками микроканала. Данный режим наблюдается только в условиях хорошей смачиваемости, когда контактный угол близок к нулю. Целью данной работы является детальное изучение мостиков, представляющих вертикальные жидкостные переемычки, и режимов течения, в которых они формируются.

Рабочий участок, используемый в эксперименте, состоит из двух пластин (стекла и нержавеющей стали), между которыми зажимаются прокладки, регулирующие высоту микроканала. В нижней пластине из нержавеющей стали создано плоское сопло для ввода жидкости. При исследовании газожидкостного течения по каналу движется газ, а снизу под небольшим углом ( $11^\circ$ , плавный смеситель) подводится жидкость. Таким образом, создается плоский микроканал с соотношением сторон более 100. В работе использовались микроканалы следующего поперечного сечения:  $0.13 \times 20$  мм,  $0.1 \times 30$  мм и  $0.16 \times 20$  мм. В качестве газа использовался азот высокой чистоты. В качестве рабочих жидкостей использовались вода, изопропиловый спирт и FC-72. Перед экспериментом через микроканал длительное время прокачивалась жидкость для обеспечения условий хорошей смачиваемости. Газ поступает в микроканал из баллона, расход контролируется при по-

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Россия

\*E-mail: f.ronshin@gmail.com



**Рис. 1.** Мостиковый режим течения: (а) схематическое изображение (б) шлирен-фотография в микроканале сечением  $0.13 \times 20$  мм, жидкость – изопрпиловый спирт, газ – азот. Обозначения: 1 – жидкостное сопло, 2 – пленки жидкости на верхней и нижней стенках микроканала, 3 – области, заполненные жидкостью, 4 – осушенные области.

мощи высокоточных регуляторов расхода Bronkhorst в диапазоне от 20 до 10 000 мл/мин. Жидкость подается в микроканал при помощи высокоточного шприцевого насоса Cole-Parmer EW-74905-54. Визуализация двухфазного течения происходит при помощи модификации шлирен-метода, описанной в работе [11]. Для визуализации быстротекающих процессов в микроканале шлирен-система была модернизирована при помощи скоростной камеры Vision Research Phantom v.7.0 со скоростью съемки 1000 кадров в секунду с пространственным разрешением 50 мкм/пиксель. Далее полученные изображения обрабатываются и вычисляются параметры двухфазного течения.

Выполнено экспериментальное исследование газожидкостного течения. Обнаружена широкая область режимов течения, когда по микроканалу движутся жидкостные мостики (плоские “капли”). Верхняя и нижняя стенка микроканала при этом смочены, жидкостные перемишки движутся по пленкам жидкости. Характерный диаметр таких жидкостных мостиков может быть порядка ширины микроканала (несколько миллиметров), при этом их высота соответствует высоте микроканала (100, 130 и 160 мкм). Таким образом, в данном исследовании мостики предполагаются плоскими и исследуется плоское течение. На рис. 1 показан мостиковый режим течения (а) схематически и (б) шлирен-фотография в канале  $0.13 \times 20$  мм, где в качестве жидкости используется изопрпиловый спирт, а в качестве газа – азот. Формирование мостиков жидкости, как правило, происходит непосредственно возле жидкостного сопла вследствие фронтальной неустойчивости [12]. Далее мостики скользят по пленкам жидкости, оставляя за собой характерные следы (утолщение пленки жидкости). Также мостики могут отделяться от жидкости, движущейся вдоль боковых стенок канала вследствие развития волновой неустойчивости (Кельвина–Гельмгольца) [12].

Скорость жидкости, движущейся вдоль боковых стенок канала, меньше скорости газового потока в центральной части канала, за счет этого наблюдаются характерные волны. Когда амплитуда волн возрастает, наблюдаются выбросы жидкости в газовый поток, которые затем приобретают характерную эллипсоидальную форму. При этом форма мостиков, образованных вследствие этих двух различных механизмов (боковая и фронтальная неустойчивости) не отличается.

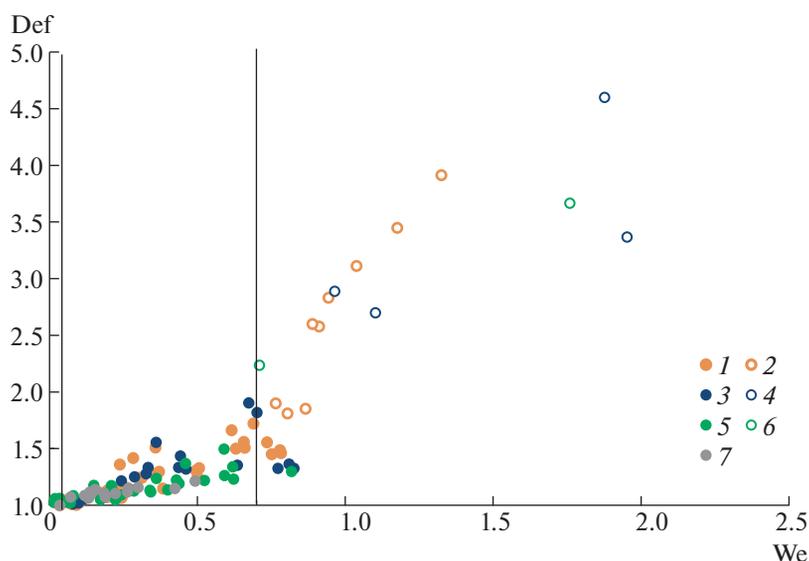
При небольших расходах газа и жидкости мостики имеют форму, близкую к кругу. С увеличением расходов мостики начинают деформироваться, приобретая эллипсоидальную форму. При дальнейшем увеличении расходов газа и жидкости мостики большого размера начинают разрушаться, формируя два мостика меньшего размера. Таким образом, можно выделить третий механизм формирования мостиков – вследствие разрушения крупных мостиков при достижении критического значения деформации. Исследована деформация мостиков жидкости, когда они имеют эллипсоидальную форму, в зависимости от числа Вебера смеси. Деформация определялась следующим образом:

$$\text{Def} = \frac{a}{b}, \quad (1)$$

где  $a$  соответствует большой полуоси эллипсоидального мостика,  $b$  – малой полуоси. Число Вебера определялось следующим образом:

$$\text{We} = \frac{\rho D U_M^2}{\sigma}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность газа,  $D = \sqrt{ab}$  – эквивалентный диаметр,  $U_M = U_{SL} + U_{SG}$  – приведенная скорость смеси,  $\sigma$  – поверхностное натяжение. Приведенные скорости газа  $U_{SG}$  и жидкости  $U_{SL}$  определялись как объемный расход газа и жидкости соответственно, деленный на площадь поперечного

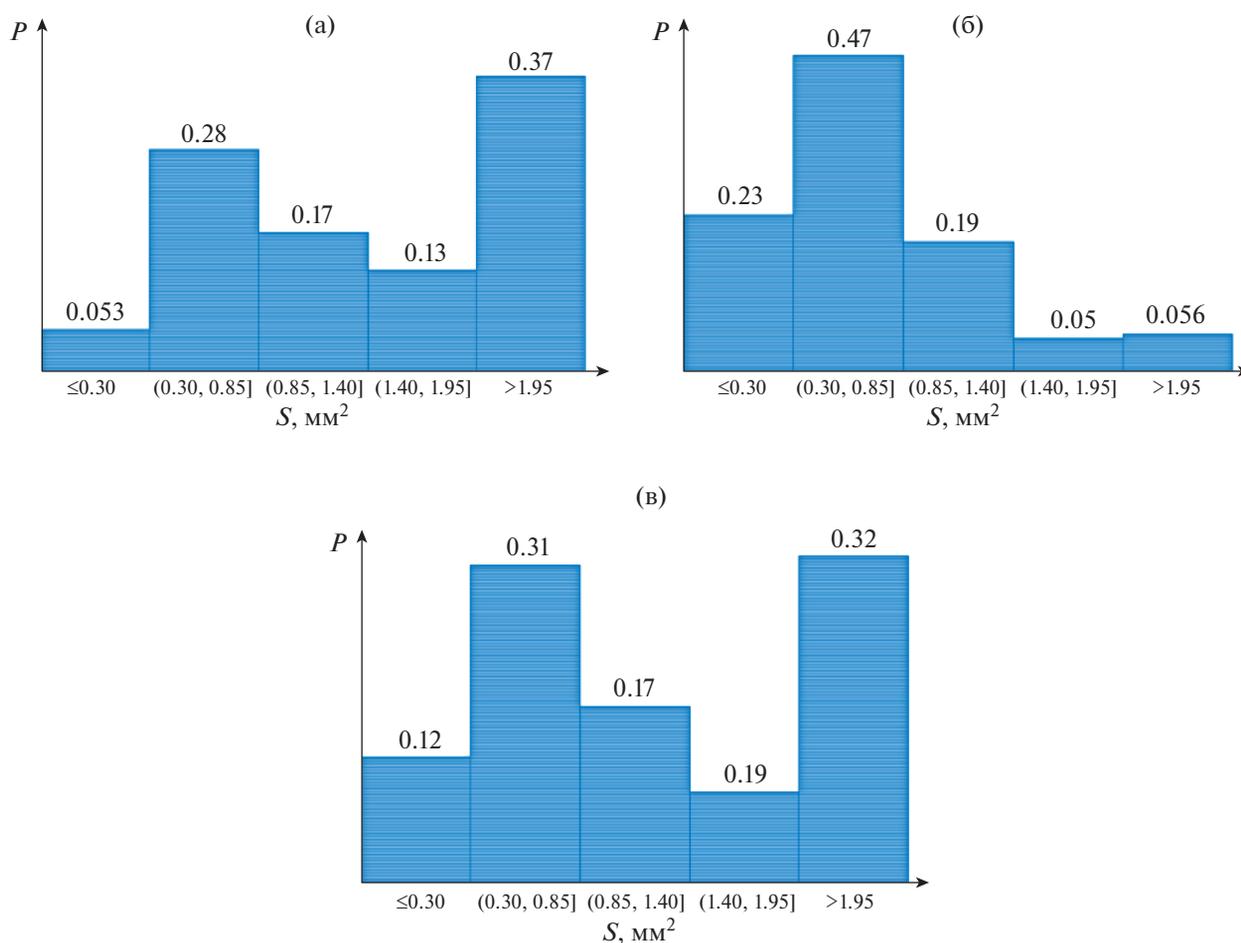


**Рис. 2.** Зависимость деформации мостиков от числа Вебера смеси. (1, 2) – микроканал сечением  $0.16 \times 20$  мм, жидкость FC-72, газ – азот, 1 – деформация мостиков; 2 – разрушение мостиков; (3, 4) – микроканал сечением  $0.13 \times 20$  мм, жидкость – изопропиловый спирт, газ – азот, 3 – деформация мостиков; 4 – разрушение мостиков; (5, 6) – микроканал сечением  $0.13 \times 20$  мм, жидкость FC-72, газ – азот; 5 – деформация мостиков; 6 – разрушение мостиков; 7 – микроканал сечением  $0.1 \times 30$  мм, жидкость – вода, газ – азот, деформация мостиков.

сечения канала. На рис. 2 показаны значения деформации мостиков жидкости в зависимости от числа Вебера смеси для всех используемых рабочих жидкостей (вода, изопропиловый спирт, FC-72) и всех исследуемых в работе микроканалов (сечения  $0.1 \times 30$  мм,  $0.13 \times 20$  мм и  $0.16 \times 20$  мм). Можно выделить три характерные области на графике. Первая, при небольших числах Вебера ( $We < 0.1$ ), когда мостики имеют форму близкую к кругу. Деформация в этом случае не превышает 1%. С увеличением числа Вебера мостики начинают деформироваться. В диапазоне чисел Вебера  $0.1 < We < 0.7$  наблюдаются эллипсоидальные мостики жидкости, с ростом числа Вебера деформация возрастает. При этом, когда мостики формируются непосредственно возле жидкостного сопла, значение их деформации незначительное и возрастает по мере движения по каналу, пока не достигнет постоянного значения. Измерения проводились в тот момент, когда форма мостика переставала меняться. При больших значениях деформации разброс значений на графике выше за счет того, что форма мостика может незначительно изменяться со временем. При числах Вебера  $We > 0.7$  деформация мостиков становится настолько большой, что возрастает со временем, а затем мостики разрушаются на два мостика меньшего размера. В этом случае деформация мостиков измерялась в момент перед распадом, когда они имеют форму, близкую к эллипсу. На графике мостики, которые после деформации распались, указаны незакрашенными маркерами. Большой разброс на графике объясняется тем, что перед разрушением деформация мостика существенно изменяется.

Поперечные размеры таких мостиков существенно зависят от скоростей газа и жидкости. На рис. 3 представлены распределения размеров мостиков в микроканале сечением  $0.16 \times 20$  мм, газ – азот, жидкость – FC-72 в зависимости от приведенных скоростей газа и жидкости. С увеличением приведенной скорости газа интенсивность формирования мостиков возрастает, а их характерный размер уменьшается. Связано это с тем, что при высоких расходах газа мостики большего размера, как правило, разрушаются, формируя мостики меньшего размера. При фиксированной приведенной скорости газа с увеличением приведенной скорости жидкости наблюдается обратная тенденция. С увеличением приведенной скорости жидкости наблюдается тенденция формирования мостиков большего размера. Связано это с тем, что газосодержание в потоке уменьшается и мостики начинают сливаться, формируя мостики большего размера. Механизмы этого процесса близки к механизмам коалесценции пузырей при пузырьковом режиме течения, когда с увеличением газосодержания пузыри начинают сливаться.

На рис. 4 представлена режимная карта двухфазных течений в микроканале сечением  $0.13 \times 20$  мм, газ – азот, жидкость – FC-72. Маркерами на графике показаны классические режимы, характерные для плоских микроканалов: струйный, пузырьковый, вспененный, отдельный и кольцевой. Подробно методика определения границ режимов двухфазных течений описана в работе [10]. Результаты измерений показывают, что в плоских микроканалах в условиях хорошей смачиваемости необходима новая классификация

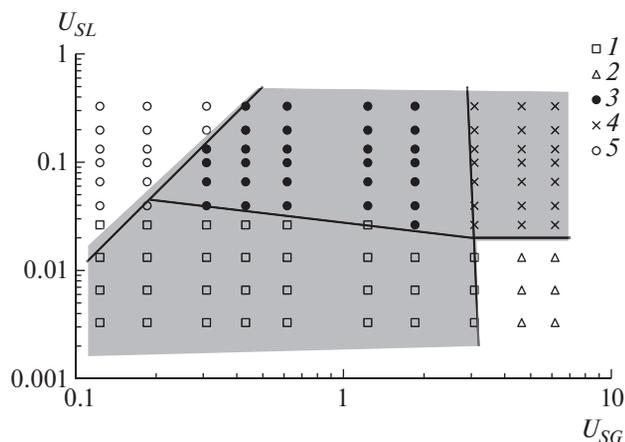


**Рис. 3.** Распределение площади мостиков в микроканале сечением  $0.16 \times 20$  мм, газ – азот, жидкость – FC-72. (а)  $U_{SL} = 0.0056$  м/с;  $U_{SG} = 0.28$  м/с; (б)  $U_{SL} = 0.0056$  м/с;  $U_{SG} = 1.11$  м/с; (в)  $U_{SL} = 0.028$  м/с;  $U_{SG} = 1.11$  м/с.  $S$  – интервал размеров мостиков;  $P$  – вероятность нахождения размера мостика в заданном интервале.

режимов двухфазных течений. Пузырьковый режим течения наблюдается, когда по микроканалу движутся пузыри газа, характерный размер которых меньше ширины микроканала. Мостиковый режим течения, или инверсионный, наблюдается, когда вертикальные перемычки жидкости между верхней и нижней стенками канала движутся по пленкам жидкости. Если рассматривать течение плоским, мостиковый режим течения напоминает инвертированный пузырьковый режим течения, когда вместо газовых пузырей наблюдаются вертикальные жидкостные перемычки (мостики). Область мостикового режима течения существенно зависит от высоты микроканала и смачиваемости поверхности, так как данный режим формируется только, когда обе стенки микроканала смочены. На рис. 4 зона мостикового режима течения закрашена. При использовании воды в качестве рабочей жидкости мостики впервые появляются в микроканале высотой 440 мкм [9] только при высоких расходах газа и жидкости. При уменьшении высоты канала интенсивность образования мостиков возрастает. В канале высо-

той 56 мкм такие мостики формируются практически во всем диапазоне расходов газа и жидкости [11]. В плоских микроканалах мостиковый режим течения можно разделить на три подрежима: струйный, вспененный и кольцевой. При высоких приведенных скоростях газа и небольших приведенных скоростях жидкости наблюдается раздельный режим, когда по нижней стенке канала движется пленка жидкости, увлекаемая потоком газа. Мостиков жидкости в таком режиме не наблюдается, так как верхняя стенка микроканала остается осушенной.

Таким образом, в настоящей работе проведено комплексное экспериментальное исследование нового режима двухфазных течений – мостикового, характерного для плоских микроканалов. Обнаружено три механизма формирования мостиков жидкости: отделение мостиков от жидкости, движущейся по боковым сторонам канала вследствие развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца; формирование непосредственно возле сопла жидкости (фронтальная неустойчивость); и вследствие разрушения вертикальных жидкостных перемычек



**Рис. 4.** Карта режимов двухфазных течений в микроканале сечением  $0.13 \times 20 \text{ мм}^2$ , газ – азот, жидкость – FC-72. Режимы течения: 1 – струйный, 2 – раздельный, 3 – вспененный, 4 – кольцевой, 5 – пузырьковый. Закрашенная область соответствует области мостикового режима течения.

при деформации. Определены критические числа Вебера, при которых мостики начинают деформироваться и разрушаться. Предложена новая классификация режимов: пузырьковый (по каналу движутся пузырьки газа), инверсионный, или мостиковый (когда в классических режимах наблюдается движение мостиков жидкости, представляющих из себя вертикальные жидкостные перемычки) и раздельный режим, не содержащий мостики.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение 19-79-00256). Шлирен-система предоставлена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (Номер гос. регистрации 121031800213-0).

## BRIDGE FLOW REGIME IN MICROCHANNELS

F. V. Ronshin<sup>a</sup>, E. A. Chinnov<sup>a</sup>, Yu. A. Dementyev<sup>a</sup>, and O. A. Kabov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Kutateladze Institute of Thermophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS S.V. Alekseenko

As a result of studies of the two-phase flow in slit microchannels, a new flow regime – bridge flow has been discovered and studied. The bridges are vertical bridges between liquid films located on the lower and upper walls of the channel. It was found that with an increase in the flow rate of gas and liquid, the bridges begin to deform and then collapse. The critical Weber numbers characteristic of the deformation and destruction of bridges are determined. A new classification of two-phase flow regimes in microchannels is proposed on the basis of the obtained experimental data.

**Keywords:** bridge flow regime, slit microchannel, two-phase flow

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sackmann E.K., Fulton A.L., Beebe D.J.* The present and future role of microfluidics in biomedical research // *Nature*. 2014. V. 507. № 7491. P. 181.
2. *Deng Y. et al.* An integrated microfluidic chip system for single-cell secretion profiling of rare circulating tumor cells // *Scientific reports*. 2014. V. 4. P. 7499.
3. *Zhu Y., Fang Q.* Analytical detection techniques for droplet microfluidics – A review // *Analytica chimica acta*. 2013. V. 787. P. 24–35.
4. *Kim J.H. et al.* Droplet microfluidics for producing functional microparticles // *Langmuir*. 2013. V. 30. № 6. P. 1473–1488.
5. *Zhang M. et al.* Controllable microfluidic strategies for fabricating microparticles using emulsions as templates // *Particuology*. 2016. V. 24. P. 18–31.
6. *Jaeseon L., Mudawar I.* Low-temperature two-phase microchannel cooling for high-heat-flux thermal management of defense electronics // *Components Packaging Technol. IEEE Trans.* 2009. V. 32. № 2. P. 453.
7. *Чиннов Е.А., Роншин Ф.В., Кабов О.А.* Режимы двухфазного течения в микро-и миниканалах (обзор) // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т. 22. № 3. С. 275–297.
8. *Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I.* Two-phase flow in microchannels // *Advances in heat transfer*. 2001. V. 34. P. 145–254.
9. *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* Образование капель в микроканалах // *Письма в ЖТФ*. 2011. Т. 37. № 14. С. 47–53.
10. *Ajaev V.S., Kabov O.A.* Levitation and Self-Organization of Droplets // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2021. V. 53. P. 203–225.
11. *Ronshin F., Chinnov E.* Experimental characterization of two-phase flow patterns in a slit microchannel // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019. V. 103. P. 262–273.
12. *Чиннов Е.А., Роншин Ф.В., Кабов О.А.* Two-phase flow patterns in short horizontal rectangular microchannels // *Int. J. Multiphase Flow*. 2016. V. 80. P. 57–68.