

УДК 532.66

Определение границы перехода между сегментированными и непрерывными режимами течения в микроканальных потоках жидкость–жидкость на основе критериев подобия*

А.В. Ковалев^{1,2}, А.А. Ягодницына^{1,2}, А.В. Бильский^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

E-mail: therfmig@gmail.com

В микроканальных потоках жидкость–жидкость существует множество различных режимов течения. Наиболее важным для практических приложений является переход от сегментированных режимов течения к непрерывным, а также предсказание данного перехода для произвольной системы жидкостей. В работе проведен подробный анализ существующих экспериментальных данных по режимам течения несмешивающихся жидкостей и представлено их обобщение на основе анализа размерностей. Показано, что предложенный ранее критерий ($We^{0.4}Oh^{0.6}$), включающий в себя числа Вебера и Онезорге, позволяет предсказать переход между непрерывным и сегментированным потоком с хорошей точностью в случае отношения вязкостей фаз $\lambda = \mu_d / \mu_c$ меньшем либо равном единице. При отношении вязкостей $\lambda > 1$ указанный критерий перестает работать, и для построения обобщающего параметра в случае таких систем жидкостей требуются дополнительные экспериментальные данные.

Ключевые слова: микроканалы, режимы течения, несмешивающиеся жидкости, анализ размерностей.

Введение

Многофазные потоки с наличием межфазных поверхностей, в частности, потоки несмешивающихся жидкостей в микроканальных условиях встречаются повсеместно как в природе [1], так и в различных технических устройствах [2]. Ключевым отличием микроканальных потоков газ–жидкость и жидкость–жидкость от аналогичных течений на крупных масштабах является преобладание сил межфазного натяжения над силами тяжести вследствие увеличения характерной площади поверхности к заключенному в ней объему с уменьшением геометрических размеров. Такое изменение в балансе сил приводит к качественным отличиям в режимах течения и механизмах их формирования. Несмотря на широкий спектр возможных режимов течения их можно разбить на две категории: сегментированные режимы, в которых происходит формирование новых единиц межфазной поверхности (капель, пузырей, снарядов и т.д.), и режимы непрерывные,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90175 «Аспиранты». Экспериментальные данные, анализируемые в работе, получены в рамках гранта президента РФ МК-1230.2021.4. Экспериментальная установка и оборудование приобретены за средства государственного задания ИТ СО РАН.

где фазы текут без разрушения границы раздела (параллельный, кольцевой, ручейковый и т.д.). Переход между сегментированными и непрерывными режимами течения, как правило, является наиболее интересным с практической точки зрения, соответственно при проектировании микроканальных устройств необходимо знать диапазон управляющих параметров системы, в котором происходит данный переход [3].

Как правило, границы переходов между режимами течения определяют экспериментально и представляют в виде карты режимов, построенной, например, по приведённым скоростям фаз. Однако такие карты режимов пригодны лишь для заданной системы жидкостей и геометрии канала, используемых в эксперименте. Для определения же границ между режимами в общем случае применяют в основном два подхода. Первый — построение полуэмпирических моделей с использованием различных упрощений и приближений в уравнениях сплошной среды, второй — применение анализа размерностей и поиск подходящих безразмерных комплексов и их степеней. Оба подхода имеют как преимущества, так и недостатки. Основной недостаток первого подхода — это сложность исходных уравнений, для преодоления которой нужно вводить допущения, порой не соответствующие реальности. Так, известная модель для перехода от стратифицированного течения к снарядному, предложенная в работе [4] и основанная на предположении о неустойчивости Кельвина–Гельмгольца в качестве основного механизма перехода, неприменима уже для каналов с характерным размером 12 мм [5]. Несмотря на предложенную в работе [5] модификацию этой модели на случай каналов с диаметром около десятков миллиметров, для каналов субмиллиметрового размера она показывает неудовлетворительный результат [6]. Подход, основанный на анализе размерностей, позволяет получить результат значительно проще, однако определенные из экспериментальных данных с его помощью границы перехода должны быть тщательно верифицированы другими исследованиями. Так как итоговые безразмерные комплексы не несут информации о механизме перехода, чаще всего они также могут описать лишь те эксперименты, на основе которых были получены [7–9]. Кроме того, анализ размерностей затрудняется корректным выбором всех влияющих переменных в задаче и отсечением остальных, не вносящих вклад. Например, введение шероховатости каналов в работе [10] как одного из параметров в безразмерном комплексе для перехода между режимами течения в микроканалах, выполненных из одного материала единым способом, является крайне сомнительным. Безразмерные комплексы, показавшие себя наиболее применимыми для течений жидкость–жидкость в микроканалах, можно найти в работах [8–12].

На сегодняшний день обобщение для переходов между непрерывными и сегментированными течениями в микроканальных потоках жидкость–жидкость до сих пор не получено даже на уровне критериев подобия. Настоящая работа посвящена анализу существующего массива экспериментальных данных для указанной задачи, а также выбору наиболее оптимальных безразмерных параметров, позволяющих обобщить границу перехода между сегментированным и непрерывным потоками для разных наборов жидкостей.

Обсуждение и результаты

В соответствии с П-теоремой Бэкингема количество независимых безразмерных параметров, описывающих задачу, равно $n - k$, где n — число важных для конкретной задачи переменных, а k — число физических величин с независимыми размерностями среди n ($k \leq n$). Определение n переменных, описывающих физическое явление, не является однозначным для каждого рассматриваемого случая. На практике частью процессов и явлений в постановке задачи приходится пренебрегать, как влияющими незначительно на интересующие нас закономерности, что и определяет выбор n . Число k же определяется как число таких переменных среди n , размерности которых не могут быть выражены через произведение размерностей остальных величин в степенях. Их выбор также может

быть неоднозначным для заданных n переменных. Идея подхода на основе анализа размерностей заключается в нахождении независимых безразмерных параметров и последующем представлении полученного набора данных в виде функции от произведения этих параметров в некоторых степенях. Для двухфазных микроканальных потоков, где силой тяжести можно пренебречь, чаще всего число влияющих переменных ограничено пятью: приведённые скорости фаз U , вязкость μ , плотность ρ , межфазное натяжение σ и характерный размер (гидравлический диаметр канала) D_h . Среди этих пяти параметров можно выделить любые три в качестве переменных с независимыми размерностями так, что размерности оставшихся двух будут выражаться через них в виде степенного одночлена. Следовательно, в такой постановке задачи $n = 5$ и $k = 3$, что соответствует $n - k = 2$. Таким образом, очевидно, что одного безразмерного комплекса недостаточно для описания масштабирования явлений в таких системах. Например, в работе [11] было показано, что при построении режимных карт по числам Вебера границы переходов между различными режимами течения существенно смещаются друг относительно друга для жидкостей разной вязкости, так как вязкость не входит в этот критерий подобия.

Комбинации в виде произведения критериев подобия в определенных степенях показывают более хороший потенциал для обобщения экспериментальных данных. Так, в работе [7] на основе П-теоремы авторы получили выражение вида

$$\begin{cases} \Pi_c = A \cdot \text{Re}_c^\alpha \text{We}_c^\beta (k_s/D_h)^\gamma, \\ \Pi_d = \text{Re}_d^\alpha \text{We}_d^\beta, \end{cases} \quad (1)$$

где Re и We — числа Рейнольдса и Вебера соответственно, A — некоторая константа, k_s — шероховатость поверхности канала, индексы d и c обозначают дисперсную и несущую фазы. Степени при безразмерных комплексах определялись из экспериментальных данных по границам режимов течения и были выбраны следующие значения: $\alpha = 0,2$, $\beta = 0,4$, $\gamma = 5$, $A = 10^7$. Так как авторы включили в рассмотрение шероховатость k_s , число независимых безразмерных параметров увеличилось до трех для несущей фазы, что выражено в первом уравнении системы (1). Карты режимов, построенные с применением (1), показали хорошее совпадение для газожидкостных потоков с разными несущими фазами, рассмотренными в работе [7]. Однако для данных из других работ, а также для систем жидкость–жидкость данный параметр не показал удовлетворительных результатов [9–11]. Также вызывает вопрос влияние шероховатости, которое требует дополнительных исследований и подтверждений. В работе [12] было предложено использовать комбинацию числа Рейнольдса и капиллярного числа как по несущей, так и по дисперсной фазе, представленную уравнениями

$$\begin{cases} \Pi_c = \text{Ca}_c \text{Re}_c^{0,5}, \\ \Pi_d = \text{Ca}_d^{0,7} \text{Re}_d^{0,5}, \end{cases} \quad (2)$$

При этом видно, что степень для капиллярного числа была выбрана разной в дисперсной и несущей фазах. Указанный критерий авторы получили из своих экспериментальных данных для случая вязких дисперсных фаз в потоках жидкость–жидкость и на его основании выделили область снарядного режима, в которой силы межфазного натяжения существенно больше сил инерции и вязкого трения.

Другой критерий для потоков жидкость–жидкость в Т-образных микроканалах в широких диапазонах значений вязкостей фаз был получен авторами настоящей работы ранее [11]. С помощью анализа размерностей было показано, что комбинация числа Вебера и числа Онезорге дает наилучшее обобщение экспериментальных данных:

$$\Pi = \text{We}^{\alpha/2} \text{Oh}^\beta, \quad (3)$$

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{D_h \rho \sigma}} = \frac{\sqrt{We}}{Re}. \quad (4)$$

В работе [11] были выбраны следующие значения показателей: $\alpha = 2, \beta = 1$.

Одним из характерных моментов для всех перечисленных выше работ является попытка обобщить всю карту режимов, а не один конкретный переход. Такая методология как характеристика режимных карт по диапазонам действующих в системе сил кажется логичной на первый взгляд, однако не имеет под собой веских оснований в силу того, что физические явления при переходах между разными режимами могут существенно отличаться. Развивая эту идею, авторы рассмотрели переход только между сегментированными и непрерывными режимами течения для жидкостей с разными вязкостями [13], что позволило скорректировать степени в уравнении (3) следующим образом: $\alpha = 0,8, \beta = 0,6$, и существенно повысить точность обобщения. Для верификации данного безразмерного комплекса было проведено сравнение карт режимов микроканальных потоков жидкость–жидкость из различных литературных источников ([9, 12, 14–21]) и данных, полученных авторами в ряде предыдущих работ ([11, 13, 22, 23]). Результаты различных работ приведены для сравнения на рис. 1. Здесь представлены графики восьми разных наборов жидкостей, в трех из которых дисперсная фаза была неньютоновской и вязкость рассчитывалась по оценке характерного сдвига в микроканале заданного размера [23]. Несущей фазой во всех случаях были вязкие касторовые масла ($\mu_c > 600$ мПа·с), дисперсная фаза для каждого набора жидкостей указана на рисунке. Предложенный безразмерный параметр описывает переход от сегментированного потока к непрерывному с хорошей точностью. Линии, соответствующие границе между сегментированными и непрерывными режимами течения, имеют близкие значения угла наклона и практически совпадают в предложенных координатах с учетом погрешностей. Это свидетельствует о том, что рассматриваемый переход между разными видами режимов базируется на одном физическом механизме для жидкостей различных свойств. При сравнении с литературными данными было обнаружено, что только часть из них можно обобщить с использованием (3), эти данные представлены на рис. 2 вместе с графиками рис. 1.

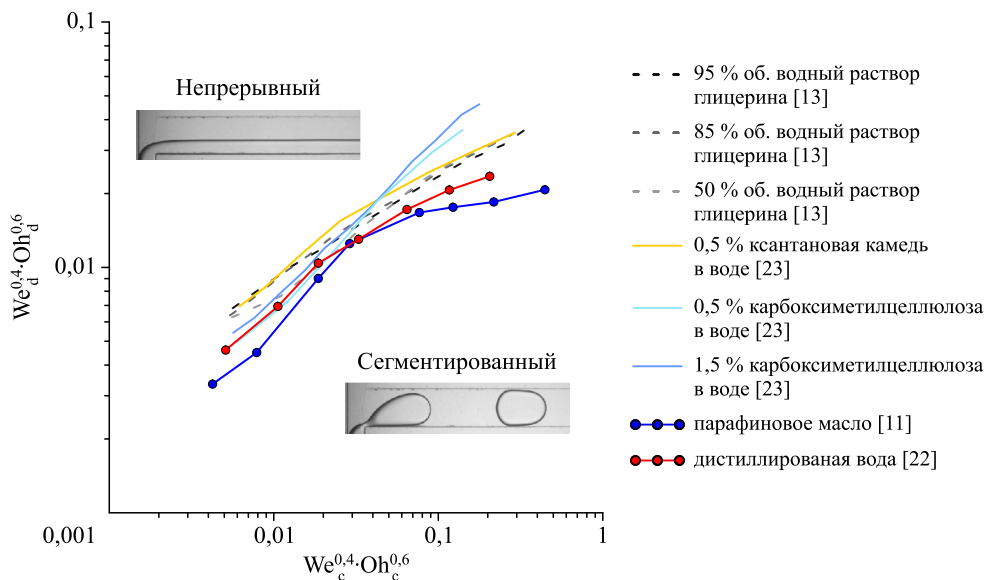


Рис. 1. Границы переходов между непрерывным и сегментированным потоками из предыдущих работ авторов.
 Несущая фаза для всех случаев — касторовое масло;
 дисперсные фазы и соответствующие публикации указаны в поле рисунка.

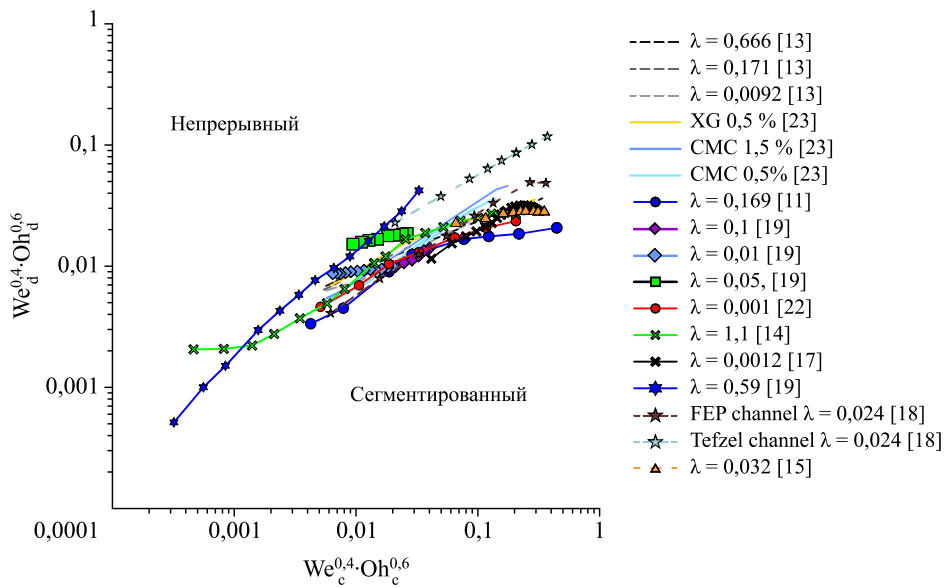


Рис. 2. Границы переходов между непрерывным и сегментированным потоками из работ различных авторов для отношения вязкостей $\lambda = \mu_d/\mu_c$ меньшим либо близким к единице.

Несмотря на различие экспериментальных установок, геометрии сечений и входов микроканалов, а также возможные погрешности в определении границ перехода предложенный критерий все еще демонстрирует удовлетворительный результат. Однако все данные, которые удалось обобщить, объединяет отношение вязкостей фаз $\lambda = \mu_d/\mu_c$ меньше либо равное единице. Расхождения возникают с увеличением λ и имеют место для всех рассмотренных случаев при $\lambda > 1$. На рис. 3а показаны данные с рис. 2 в виде отдельных точек, их аппроксимация степенной зависимостью и ее 95 % доверительный интервал, а на рис. 3б приведена для сравнения полученная аппроксимация и данные для $\lambda > 1$. Как видно, все границы для $\lambda > 1$ имеют разную форму и наклон в обобщающих безраз-

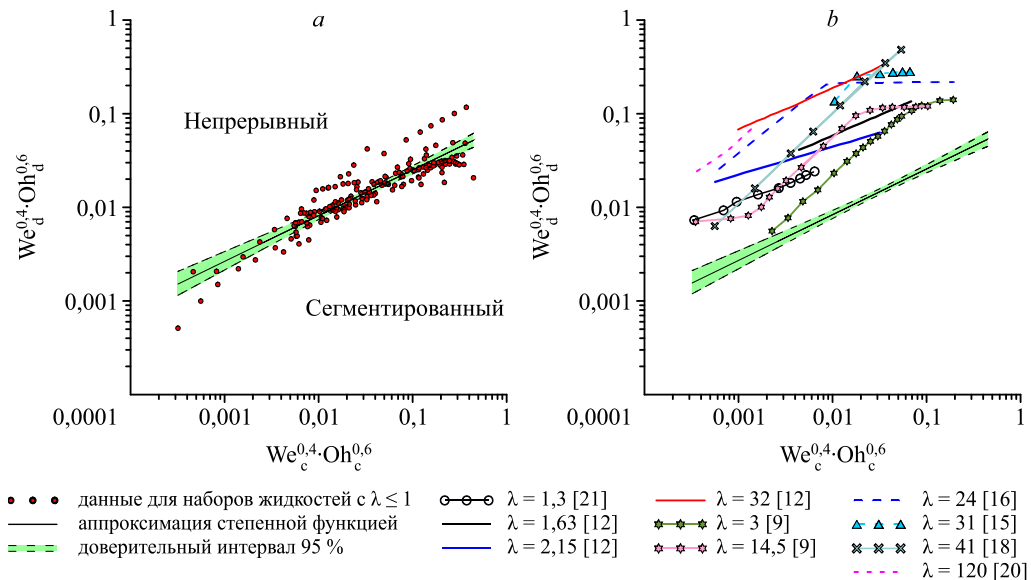


Рис. 3. Данные для наборов жидкостей с $\lambda \leq 1$, аппроксимированные степенной функцией (а) и сравнение полученной аппроксимации и границ переходов из различных работ для $\lambda > 1$ (б).

мерных координатах, что подтверждает качественное изменение механизма перехода между сегментированным и непрерывным потоками, когда дисперсная фаза является более вязкой. Другим интересным результатом является увеличение области сегментированного потока для всех случаев $\lambda > 1$ в представленных координатах. Следовательно, в системах с вязкой дисперсной фазой предложенный критерий показывает наличие дополнительных сил, препятствующих переходу от сегментированного потока к непрерывному. Следует отдельно отметить, что критерии (1), (2) и еще несколько реже используемых в литературе безразмерных комплексов не показали удовлетворительного результата ни для $\lambda < 1$, ни для $\lambda > 1$. Критерий (2), предложенный для потоков с $\lambda > 1$, хорошо обобщает лишь данные получивших его авторов [12], в то время как границы переходов из других работ остаются разнесены в абсолютных значениях на несколько порядков величины безразмерного критерия. Таким образом, случай $\lambda > 1$ требует отдельного рассмотрения и дополнительных работ по построению карт режимов.

Заключение

Проанализирован подход на основе анализа размерностей для обобщения границ перехода между сегментированными и непрерывными режимами течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах. Рассмотрены наиболее часто используемые в литературе комбинации критериев подобия для двухфазных микроканальных потоков. Показано, что ранее предложенная безразмерная комбинация $We^{0.4}Oh^{0.6}$ с хорошей точностью дает обобщение данных, полученных в различных наборах жидкостей для ряда геометрий входов и сечений микроканалов. Обнаружено, что механизм перехода сегментированный режим–непрерывный режим зависит от отношения вязкостей фаз $\lambda = \mu_d/\mu_c$ и качественно отличается для случаев $\lambda > 1$ и $\lambda < 1$, при этом область существования сегментированного потока увеличивается при $\lambda > 1$. Предложенный безразмерный комплекс не работает для случая $\lambda > 1$, а имеющихся для этого случая данных недостаточно для корректного обобщения.

Список литературы

1. Song W., De Haas T.W., Fadaei H., Sinton D. Chip-off-the-old-rock: the study of reservoir-relevant geological processes with real-rock micromodels // *Lab on a Chip*. 2014. Vol. 14, No. 22. P. 4382–4390.
2. Wang K., Li L., Xie P., Luo G. Liquid-liquid microflow reaction engineering // *Reaction Chemistry and Engng*. 2017. Vol. 2, No. 5. P. 611–627.
3. Kriel F.H., Binder C., Priest C. A multi-stream microchip for process intensification of liquid-liquid extraction // *Chemical Engng and Technology*. 2017. Vol. 40, No. 6. P. 1184–1189.
4. Taitel Y., Dukler A.E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow // *AIChE J*. 1976. Vol. 22, No. 1. P. 47–55.
5. Barnea D., Luninski Y., Taitel Y. Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes // *The Canadian J. Chemical Engng*. 1983. Vol. 61, No. 5. P. 617–620.
6. Triplett K.A., Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I., Sadowski D.L. Gas-liquid two-phase flow in microchannels. Part I. Two-phase flow patterns // *Intern. J. Multiphase Flow*. 1999. Vol. 25, No. 3. P. 377–394.
7. Waelchli S. Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors // *Intern. J. Multiphase Flow*. 2006. Vol. 32, No. 7. P. 791–806.
8. Kashid M., Kiwi-Minsker L. Quantitative prediction of flow patterns in liquid-liquid flow in micro-capillaries // *Chemical Engng and Processing: Process Intensification*. 2011. Vol. 50, No. 10. P. 972–978.
9. Wu Z., Cao Z., Sundén B. Liquid-liquid flow patterns and slug hydrodynamics in square microchannels of cross-shaped junctions // *Chemical Engng Sci*. 2017. Vol. 174. P. 56–66.
10. Fu T., Wei L., Zhu C., Ma Y. Flow patterns of liquid-liquid two-phase flow in non-Newtonian fluids in rectangular microchannels // *Chemical Engng and Processing: Process Intensification*. 2015. Vol. 91. P. 114–120.
11. Yagodnitsyna A.A., Kovalev A.V., Bilsky A.V. Flow patterns of immiscible liquid-liquid flow in a rectangular microchannel with T-junction // *Chemical Engng J*. 2016. Vol. 303. P. 547–554.
12. Zhang Q., Liu H., Zhao S., Yao C., Chen G. Hydrodynamics and mass transfer characteristics of liquid-liquid slug flow in microchannels: the effects of temperature, fluid properties and channel size // *Chemical Engng J*. 2019. Vol. 358. P. 794–805.
13. Kovalev A.V., Yagodnitsyna A.A., Bilsky A.V. Viscosity ratio influence on liquid-liquid flow in a T-shaped microchannel // *Chemical Engng and Technology*. 2021. Vol. 44, No. 2. P. 365–370.

14. **Zhao Y., Chen G., Yuan Q.** Liquid-liquid two-phase flow patterns in a rectangular microchannel // *AIChE J.* 2006. Vol. 52, No. 12. P. 4052–4060.
15. **Salim A., Fourar M., Pironon J., Sausse J.** Oil-water two-phase flow in microchannels: flow patterns and pressure drop measurements // *Canadian J. Chemical Engng.* 2008. Vol. 86, No. 6. P. 978–988.
16. **Cubaud T., Mason T.G.** Capillary threads and viscous droplets in square microchannels // *Physics of Fluids.* 2008. Vol. 20, No. 5. P. 053302-1–053302-12.
17. **Foroughi H., Kawaji M.** Viscous oil-water flows in a microchannel initially saturated with oil: flow patterns and pressure drop characteristics // *Intern. J. Multiphase Flow.* 2011. Vol. 37, No. 9. P. 1147–1155.
18. **Tsaoulidis D., Dore V., Angeli P., Plechkova N.V., Seddon K.R.** Flow patterns and pressure drop of ionic liquid-water two-phase flows in microchannels // *Intern. J. Multiphase Flow.* 2013. Vol. 54. P. 1–10.
19. **Wehking J.D., Gabany M., Chew L., Kumar R.** Effects of viscosity, interfacial tension, and flow geometry on droplet formation in a microfluidic T-junction // *Microfluidics and Nanofluidics.* 2014. Vol. 16, No. 3. P. 441–453.
20. **Bai L., Fu Y., Zhao S., Cheng Y.** Droplet formation in a microfluidic T-junction involving highly viscous fluid systems // *Chemical Engng Sci.* 2016. Vol. 145. P. 141–148.
21. **Kovalchuk N.M., Roumpea E., Nowak E., Chinaud M., Angeli P., Simmons M.J.H.** Effect of surfactant on emulsification in microchannels // *Chemical Engng Sci.* 2018. Vol. 176. P. 139–152.
22. **Kovalev A.V., Yagodnitsyna A.A., Bilsky A.V.** Flow hydrodynamics of immiscible liquids with low viscosity ratio in a rectangular microchannel with T-junction // *Chemical Engng J.* 2018. Vol. 352. P. 120–132.
23. **Yagodnitsyna A., Kovalev A., Bilsky A.** Liquid-liquid flows with non-Newtonian dispersed phase in a T-junction microchannel // *Micromachines.* 2021. Vol. 12, No. 3. P. 1–14.

*Статья поступила в редакцию 30 июля 2021 г.,
после доработки — 6 октября 2021 г.,
принята к публикации 20 октября 2021 г.*