

ISSN: 2658–5782

Номер 1

2025

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Экспериментальное исследование гидродинамической устойчивости течения жидкости в кольцевом канале

А.А. Мухутдинова¹, А.Д. Низамова¹✉, В.Н. Киреев²

¹ Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа

E-mail: adeshka@yandex.ru

Вопросы, связанные с переходными режимами течения жидкости в каналах различного сечения, являются одними из наиболее важных при решении прикладных задач гидродинамики. При проектировании теплообменных устройств, систем охлаждения и промышленных конденсаторов существенную роль играет учет неоднородного распределения температуры на характеристики потока. Особенно актуальной представляется проблема определения условий ламинарно-турбулентного перехода в условиях интенсивного теплообмена. В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование влияния параметра термовязкости на гидродинамическую устойчивость течения в кольцевом канале. Динамическая вязкость жидкостей должна рассматриваться как функция температуры и для различных теплоносителей и зависеть от их физических свойств. Ранее теоретически было установлено, что учет неоднородности распределения вязкости по сечению канала может существенным образом влиять на критические значения числа Рейнольдса. С этой целью проведены эксперименты на установке, основу которой составили две горизонтально расположенные коаксиальные трубы, выполненные из прозрачного материала. Во внутренней трубе находился нагревательный элемент для создания температурного градиента в сечении кольцевого канала. Переход от ламинарного течения к турбулентному определялся визуально с применением раствора перманганата калия. Для минимизации влияния конвективных потоков полая игла, через которую подавалась подкрашенная жидкость, располагалась в нижней части кольцевого канала. Эксперименты проводились с использованием игл со скошенным и прямым срезами. В качестве рабочих жидкостей были выбраны вода и 45%-й водный раствор пропиленгликоля. Для определения параметра термовязкости проведены детальные измерения вязкости 45%-го водного раствора пропиленгликоля в диапазоне температур от -8 до 70 °С. Все измерения осуществлялись с использованием ротационного модульного высокоточного реометра Thermo Scientific HAAKE MARS III с интегрированной электроникой и электромагнитными клапанами для термостатирования. Получено, что вязкость раствора пропиленгликоля нелинейно уменьшается с увеличением процентного содержания воды, а также уменьшается при повышении температуры по закону, близкому к экспоненциальному. Показано, что критическое число Рейнольдса зависит от распределения вязкости по сечению канала, связанной с разностью температур на стенках канала.

Ключевые слова: параметр термовязкости, гидродинамическая устойчивость, эксперимент, кольцевой канал, число Рейнольдса, 45%-й водный раствор пропиленгликоля

Experimental study of hydrodynamic stability of liquid flow in an annular channel

A.A. Mukhutdinova¹, A.D. Nizamova¹✉, V.N. Kireev²

¹ Mavlyutov Institute of Mechanics of UFRC RAS, Ufa, Russia

² Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

E-mail: adeshka@yandex.ru

The issues related to transient modes of fluid flow in channels of various cross-sections are among the most important in solving applied problems of hydrodynamics. In the design of heat exchange devices, cooling systems and industrial condensers, it is essential to take into account the non-uniform temperature distribution on the flow characteristics. The problem of determining the conditions of the laminar–turbulent transition under conditions of intense heat exchange seems to be especially relevant. In this paper, an experimental study of the effect of the thermal viscosity parameter on the hydrodynamic stability of flow in an annular channel is performed. The dynamic viscosity of liquids should be considered as a function of temperature and for different heat carriers and depends on their physical properties. Earlier, it was theoretically established that taking into account the non-uniformity of the viscosity distribution over the channel cross-section can significantly affect the critical values of the Reynolds number. For this purpose, experiments were carried out on a setup

based on two horizontally located coaxial pipes made of transparent material. The inner pipe contained a heating element to create a temperature gradient in the cross-section of the annular channel. The transition from laminar to turbulent flow was determined visually using a potassium permanganate solution. To minimize the influence of convective flows, a hollow needle through which the colored liquid was supplied was located in the lower part of the annular channel. The experiments were carried out with beveled and straight-cut needles. Water and 45% aqueous propylene glycol solution were selected as working fluids for the experiment. To determine the thermal viscosity parameter, detailed viscosity measurements of a 45% aqueous propylene glycol solution were carried out in the temperature range from -8 to 70°C . All measurements were carried out using a Thermo Scientific HAAKE MARS III rotary modular high-precision rheometer with integrated electronics and electromagnetic valves for thermostating. It was found that the viscosity of the propylene glycol solution nonlinearly decreases with an increase in the percentage of water, and also decreases with an increase in temperature according to a law close to exponential. It is shown that the critical Reynolds number depends on the viscosity distribution over the channel cross-section, associated with the temperature difference on the channel walls.

Keywords: thermoviscosity parameter, hydrodynamic stability, experiment, annular channel, Reynolds number, 45% aqueous propylene glycol solution

1. Введение

Вопросы, связанные с переходными режимами течения жидкостей, играют ключевую роль в решении задач гидродинамики, особенно в прикладных аспектах. В современных исследованиях особое внимание уделяется определению влияния неоднородного распределения температурного поля на устойчивость течения жидкостей с учетом зависимости их вязкости от температуры. Первыми в этой области стали Поттер и Грабер [1], которые установили влияние разности температур на стенках канала на критическое число Рейнольдса. Впоследствии множество авторов продолжили эти исследования, среди них выделяется работа Уолла и Уилсона [2]. Наиболее полное и систематическое изложение задач гидродинамической устойчивости и методов их решения можно найти в книге Дразина [3]. Стоит учитывать также, что, если вязкость жидкости зависит от температуры, то профиль скорости необходимо привести в соответствие с законом изменения вязкости, и это, по видимому, впервые было сделано в [4].

В статье [5] изучается поток несжимаемой жидкости в плоском канале, характеризующийся заданным температурным полем и перепадом давления. Полученные результаты показывают, что неоднородность температурного поля существенно влияет на устойчивость потока. Обнаружено, что при определенных значениях температурного поля поток становится неустойчивым, что может привести к турбулизации, а также, что нейтральные кривые для случая неизотермического течения отличаются от нейтральных кривых для случая изотермического течения. Исследованы влияния параметра зависимости вязкости жидкости от температурного поля на критические характеристики потока.

В статье [6] рассматриваются некоторые особенности потери устойчивости ламинарного течения жидкости с экспоненциальной зависимостью вязкости от температуры в кольцевом канале при заданном на его стенках температурном режиме. Выведено обобщенное уравнение Орра–Зоммерфельда, которое было записано относительно функции потока. Проведено численное исследование соответствующей краевой задачи с

использованием спектрального метода на основе полиномов Чебышева. Показано, что с учетом влияния температуры на вязкость жидкости, которое подразумевает ее неравномерное распределение по сечению канала, происходит уменьшение критического числа Рейнольдса, что согласуется с результатами предыдущих исследований [5]. В частности, как отмечалось ранее, для узкого канала и при малом параметре термовязкости спектр собственных значений идентичен спектру изотермического течения в плоском канале. Изменение относительной ширины канала и увеличение параметра термовязкости приводит к существенной перестройке структуры спектра собственных значений обобщенного уравнения Орра–Зоммерфельда. В результате проведенных исследований выявлены зависимости критического числа Рейнольдса от экспоненциального коэффициента (или другими словами, безразмерного параметра термовязкости $(d\mu/dT)/(\mu/T)$, характеризующего интенсивность изменения вязкости с повышением температуры), а также от параметра, определяющего соотношение зависимости ширины кольцевого канала от радиуса внутренней цилиндрической поверхности. Установлено, что с увеличением параметра относительной ширины канала значение критического числа Рейнольдса изменяется немонотонно, а его минимальное значение зависит от реологических свойств жидкости. Последнее обстоятельство может служить теоретическим обоснованием проведения оптимизационных расчетов при моделировании технологических процессов. Зависимость критического числа Рейнольдса от параметра термовязкости имеет вид, близкий к убывающей экспоненте функции для всех размеров кольцевых каналов. Последние полученные авторами настоящей работы результаты с использованием основных принципов слабо нелинейной теории гидродинамической устойчивости опубликованы в [7].

В настоящей работе выполнены экспериментальные исследования устойчивости течения жидкости в кольцевом канале на основе экспериментальной установки, описанной в статье авторов [8]. Установка на данный момент времени имеет форму кольцевого ка-

нала, но возможна ее модификация для различных форм канала. Параметр вязкости жидкости регулируется для произвольных теплоносителей и от заданных диапазонов температуры. Данный момент является важным аспектом при разработке систем теплообмена и промышленных конденсаторов.

2. Реологические свойства рабочей жидкости

Свойства воды хорошо изучены и известны. Для более глубокого анализа реологических характеристик пропиленгликоля были проведены измерения вязкости в различных концентрациях: 100 %, 60 %, 45 % и 30 % при температуре 25 °С. Для определения параметра термовязкости выполнены детальные измерения вязкости 45%-го водного раствора пропиленгликоля в диапазоне температур от –8 до 70 °С (табл. 1).

Все измерения осуществлялись с использованием ротационного модульного высокоточного реометра Thermo Scientific HAAKE MARS III с интегрированной электроникой и электромагнитными клапанами для термостатирования лаборатории «Экспериментальная гидродинамика» ИМех УФИЦ РАН. Этот прибор предназначен для измерений динамической вязкости жидкостей и проведения реологических исследований. Чистый пропиленгликоль при температуре 25 °С имеет вязкость 0,045 Па·с, что превышает вязкость воды при той же температуре в 45 раз. Вязкость раствора пропиленгликоля нелинейно уменьшается с увеличением процентного содержания воды, а также уменьшается при повышении температуры по закону, близкому к экспоненциальному (рис. 1).

При температуре 20–25 °С вязкость указанного раствора пропиленгликоля оказывается в 4,5–5,5 раз выше, чем вязкость воды (рис. 2).

Таким образом было получено более полное представление о реологических свойствах пропиленгликоля при разных концентрациях и температурах.

3. Методика проведения эксперимента

Для контроля за струей жидкости в потоке использован красящий элемент — раствор перманганата калия $KMnO_4$.

Использование перманганата калия в качестве красителя обусловлено его химическими свойствами, которые обеспечивают хорошую растворимость, видимость и различимость в потоке жидкости.

Для осуществления эксперимента в качестве рабочих жидкостей были выбраны вода и 45%-й водный раствор пропиленгликоля. Процесс подготовки к эксперименту включал следующие шаги:

1. Подготовка 45%-го водного раствора пропиленгликоля — в специальной бочке были смешаны дистиллированная вода и чистый пропиленгликоль. Эти компоненты были тщательно перемешаны, чтобы достичь желаемой концентрации 45%-го водного раствора пропиленгликоля.

Таблица 1. Динамическая вязкость водного раствора пропиленгликоля, Па·с

T, °C	Концентрация, %			
	30 %	46 %	60 %	100 %
–8	–	0.025199	–	–
0	–	0.014385	–	–
10	–	0.008439	–	–
20	–	0.005383	–	–
25	0.002617	0.004465	0.007629	0.045044
30	–	0.00362	–	–
40	–	0.002594	–	–
50	–	0.001964	–	–
60	–	0.001627	–	–
70	–	0.001261	–	–

2. Заполнение системы — после успешного приготовления раствора включен насос для заполнения трубы выбранными рабочими жидкостями.
3. Включение греющего кабеля и термостатов — после заполнения системы жидкостью включены греющий кабель и термостаты. Греющий кабель использовался для нагрева и поддержания определенной температуры, а термостаты контролировали и регулировали процесс подогрева.

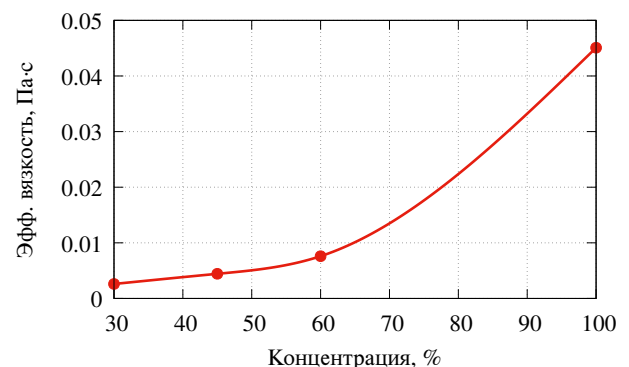


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости от концентрации водного раствора пропиленгликоля

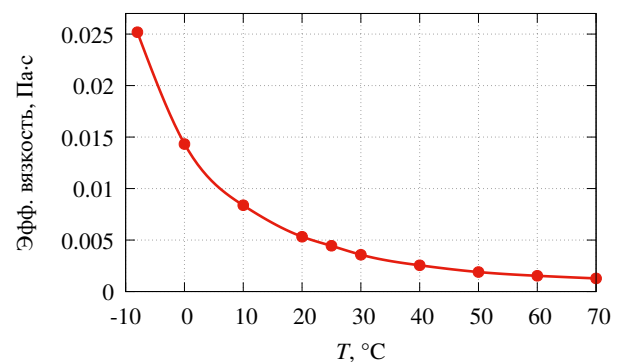


Рис. 2. Зависимость динамической вязкости 45%-го водного раствора пропиленгликоля от температуры

4. Подготовка подкрашенной жидкости — для создания визуально различимых условий эксперимента приготовлены три различных подкрашенных раствора, каждый из которых представляет собой уникальный состав. Первый раствор получен путем смешивания дистиллированной воды с перманганатом калия. Этот вариант подкрашенной жидкости предоставляет базовую основу для визуального контраста. Второй раствор содержит дистиллированную воду, пропиленгликоль и перманганат калия в концентрации, равной концентрации рабочей жидкости. Добавление пропиленгликоля выравнивает физические свойства и расширяет диапазон условий эксперимента, что является важным аспектом для более обширного анализа. Третий раствор создан с использованием чистого пропиленгликоля и перманганата калия. Таким образом, использование разнообразных подкрашенных растворов дополняет методику эксперимента для лучшей визуальной оценки и анализа.

Далее приступаем к проведению эксперимента. В емкость наливаем заранее приготовленный подкрашенный раствор, затем устанавливаем и настраиваем камеру для детальной записи результатов. После этого открываем вентиль, позволяя подкрашенной жидкости поступать в основной поток. Учитывая, что наш насос обладает несколькими режимами скоростей, мы проводим исследование при различных заранее выбранных скоростях потока.

4. Результаты экспериментов

Созданная экспериментальная установка позволила провести экспериментальные исследования режимов течения раствора пропиленгликоля в кольцевом канале. Внутренняя цилиндрическая труба установки содержит нагревательный элемент. Для минимизации влияния конвективных потоков полая игла, через которую подавалась подкрашенная жидкость, располагалась в нижней части кольцевого канала. Вначале эксперименты проводились со стандартной медицинской иглой со скошенным срезом.

При достаточно малых расходах жидкости при значениях числа Рейнольдса равного $Re = 1000$ поток имеет ярко выраженный ламинарный режим течения (рис. 3(a)). Однако, при этом течение, образующееся при обтекании нагретой цилиндрической поверхности, способствует искривлению формы струи, которая, в итоге, устремляется вверх.

Начиная со значений числа Рейнольдса $Re = 1800$ на данной установке наблюдались развивающиеся возмущения (рис. 3(b), 3(c)).

Проведение экспериментов с прямым срезом продемонстрировали аналогичную картину течений (рис. 4). Небольшое отличие состояло лишь в том, что форма струи искривлялась значительно меньше. Для сравнения приведены фотографии экспериментов по визуализации потока воды с помощью подачи

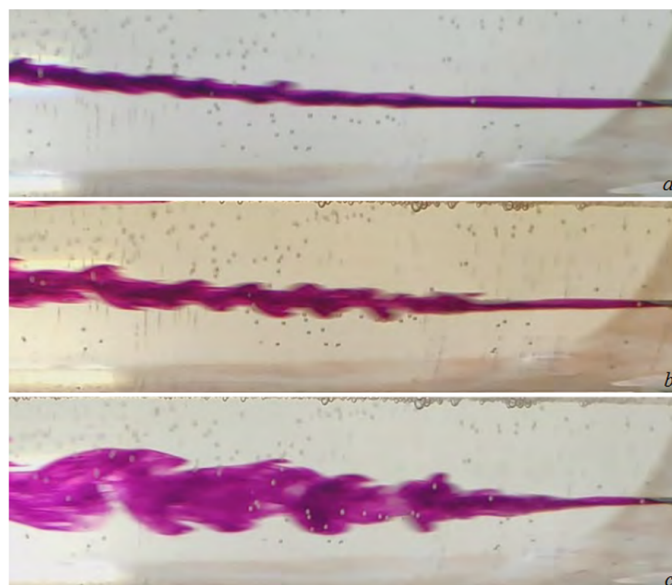


Рис. 3. Поведение струи подкрашенной воды в потоке 45%-го раствора пропиленгликоля (игла со скошенным срезом) при $dT = 0$ °C: (a) $Re = 1000$, (b) $Re = 1800$, (c) $Re = 2300$

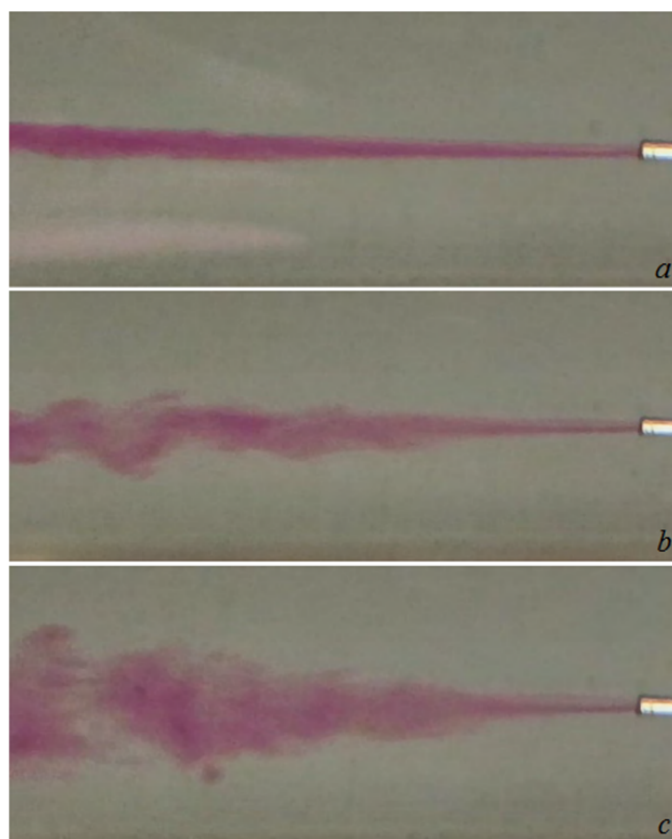


Рис. 4. Поведение струи подкрашенной воды в потоке 45%-го раствора пропиленгликоля (игла с прямым срезом) при $dT = 0$ °C: (a) $Re = 1000$, (b) $Re = 1800$, (c) $Re = 2400$

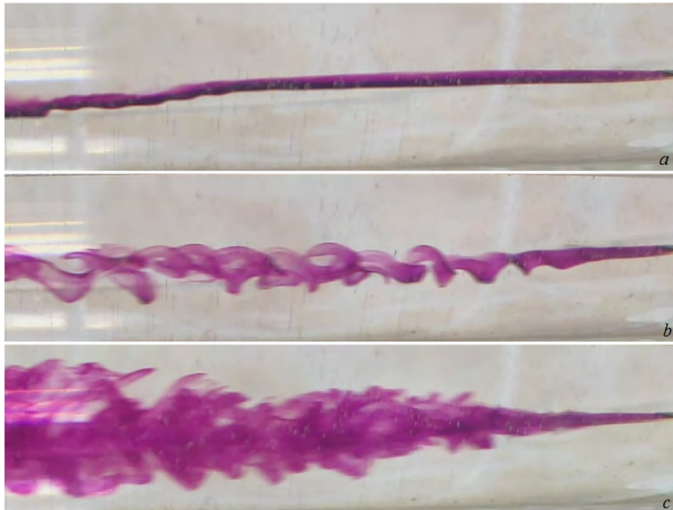


Рис. 5. Поведение струи подкрашенной воды в потоке воды (игла со скошенным срезом) при $dT = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$: (a) $Re = 1000$, (b) $Re = 1800$, (c) $Re = 2400$

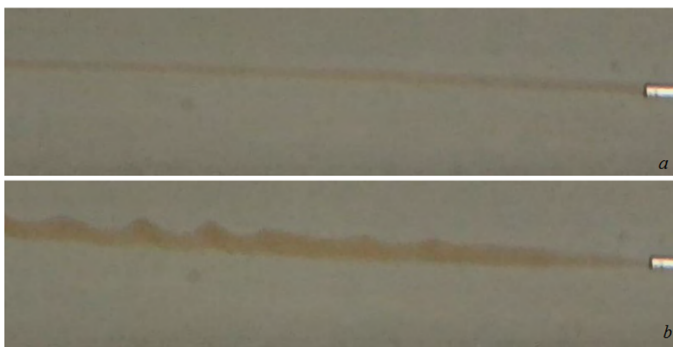


Рис. 6. Поведение струи подкрашенного пропиленгликоля в потоке 45%-го раствора пропиленгликоля (игла с прямым срезом) при $Re = 1500$: (a) $dT = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $dT = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

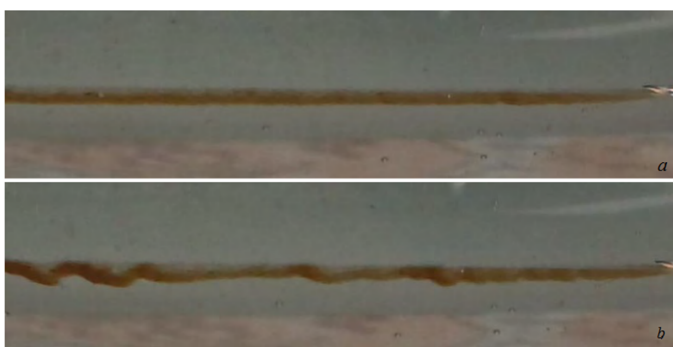


Рис. 7. Поведение струи подкрашенного пропиленгликоля в потоке 45%-го раствора пропиленгликоля (игла с прямым срезом) при $Re = 1600$: (a) $dT = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $dT = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

подкрашенной воды (рис. 5). Интересно, что в этом случае струя подкрашенной жидкости при ламинарном течении отклонялась вниз.

Визуализации картины течения раствора пропиленгликоля с помощью подкрашенного раствора того же вещества проводилась при различных значениях числа Рейнольдса равных 1500 (рис. 6) и 1600 (рис. 7). В изотермическом случае при обоих значениях числа Re наблюдается картина ламинарного течения, а задание градиента температур приводит к турбулизации потока.

На рис. 8 приведены фотографические изображения эволюции вихревых структур подкрашенной струи раствора пропиленгликоля в потоке того же состава вдали от иглы при $Re = 1800$ в отсутствие градиента температур.

5. Заключение

С помощью экспериментальных данных показано, что перепад температур между стенками канала влияет на критическое число Рейнольдса, поскольку вязкость жидкости зависит от температуры. При отсутствии градиента температур развивающиеся возмущения наблюдались начиная с $Re = 1800$. Визуализации картины течения раствора пропиленгликоля с помощью подкрашенного раствора того же вещества проводилась при значениях числа Рейнольдса $Re = 1500$ и 1600 . В изотермическом случае при обоих значениях числа Re наблюдалась картина ламинарного течения, а задание градиента температур привела к турбулизации потока.

Полученное в настоящей работе полное представление о реологических свойствах пропиленгликоля при разных концентрациях и температурах позволит в дальнейшем провести более детальные исследования гидродинамической устойчивости течения термовязкой жидкости в зависимости от других физических и



Рис. 8. Эволюция вихревых структур струи подкрашенного 45%-го раствора пропиленгликоля в потоке раствора 45%-го пропиленгликоля вдали от иглы при $Re = 1800$, $dT = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

геометрических параметров системы, в том числе от относительной ширины кольцевого канала (отношения ширины кольцевого канала к радиусу его внутренней цилиндрической поверхности). Такие исследования требуют применения дополнительного дорогостоящего оборудования, в частности, более мощных насоса и источника энергии.

Список литературы / References

- [1] Potter M.C., Graber E. Stability of plane Poiseuille flow with heat transfer // *Phys. Fluids*. 1972. Vol. 15. P. 387–391.
DOI: [10.1063/1.1693921](https://doi.org/10.1063/1.1693921)
- [2] Wall D.P., Wilson K. The linear stability of channel flow of fluid with temperature-dependent viscosity // *J. Fluid Mech.* 1996. Vol. 323. P. 107–132.
DOI: [10.1017/S0022112096000869](https://doi.org/10.1017/S0022112096000869)
- [3] Drazin P.G. *Introduction to Hydrodynamic Stability*. Cambridge Univ. Press. 2002.
DOI: [10.1017/CBO9780511809064](https://doi.org/10.1017/CBO9780511809064)
- [4] Yih C.S. Thermal instability of viscous fluids // *Quart. Appl. Math.* 1959. Vol. 17. P. 25–42.
DOI: [10.1090/qam/107444](https://doi.org/10.1090/qam/107444)
- [5] Nizamova A.D., Murtazina R.D., Kireev V.N., Uрманчеев S.F. Features of laminar-turbulent transition for the coolant flow in a plane heat-exchanger channel // *Lobachevskii J. Math.* 2021. Vol. 42. P. 2211–2215.
DOI: [10.1134/S1995080221090249](https://doi.org/10.1134/S1995080221090249)
- [6] Nizamova A.D., Kireev V.N., Uрманчеев S.F. The influence of the annular gap thickness on the critical Reynolds number during the flow of thermoviscous liquids // *Lobachevskii J. Math.* 2024. Vol. 45, no. 5. P. 2119–2127.
DOI: [10/1134/S1995080224602315](https://doi.org/10/1134/S1995080224602315)
- [7] Киреев В.Н., Мухутдинова А.А., Низамова А.Д., Урманчеев С.Ф. Численное и экспериментальное моделирование устойчивости течения термовязкой жидкости в кольцевом канале // *Вестник Башкирского университета*. 2024. Т. 29, № 4. С. 182–189.
Kireev V.N., Muxhutdinova A.A., Nizamova A.D., Uрманчеев S.F. Numerical and experimental modeling of the stability of the flow of thermoviscous fluid in an annular channel // *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2024. Vol. 29. N 4. Pp. 182–189. (in Russian)
DOI: [10.33184/bulletin-bsu-2024.4.2](https://doi.org/10.33184/bulletin-bsu-2024.4.2)
- [8] Мухутдинова А.А., Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчеев С.Ф. Экспериментальная установка для исследования устойчивости течения жидкости // *Многофазные системы*. 2024. Т. 19, № 1. С. 35–39.
Muxhutdinova A.A., Nizamova A.D., Kireev V.N., Uрманчеев S.F. (2024) Experimental setup for researching the stability of fluid flow. *Multiphase Systems*. 19 (1). pp. 35–39. (In Russian)
DOI: [10.21662/mfs2024.1.005](https://doi.org/10.21662/mfs2024.1.005)

Сведения об авторах / Information about the Authors

Айгуль Айратовна Мухутдинова

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Aigul A. Mukhutdinova

Mavlyutov Institute of Mechanics, UFRS RAS, Ufa, Russia

mukhutdinova23@yandex.ru

ORCID: [0000-0002-5009-002X](https://orcid.org/0000-0002-5009-002X)

Аделина Димовна Низамова

к.ф.-м.н.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Adelina D. Nizamova

Ph.D. (Physics & Mathematics)

Mavlyutov Institute of Mechanics, UFRS RAS, Ufa, Russia

adeshka@yandex.ru

ORCID: [0000-0002-7772-2672](https://orcid.org/0000-0002-7772-2672)

Виктор Николаевич Киреев

к.ф.-м.н.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Viktor N. Kireev

Ph.D. (Physics & Mathematics)

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

kireev@anrb.ru

ORCID: [0000-0002-3550-6541](https://orcid.org/0000-0002-3550-6541)