ISSN: 2658–5782

Номер 1

2024

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org

ИМех
им. Р.Р. Мавлютова

ISSN 2658–5782 Том 19 (2024), №, 1, с. 35–39

Многофазные системы

http://mfs.uimech.org/mfs2024.1.005
DOI: 10.21662/mfs2024.1.005
УДК / UDC: 532.5.013.4

Получена / Received: 24.03.2024
Принята / Accepted: 19.04.2024

Экспериментальная установка для исследования устойчивости течения жидкости

А.А. Мухутдинова*, **А.Д. Низамова***, **В.Н. Киреев****, **С.Ф. Урманчеев***

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

**Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Задача исследования устойчивости течения термовязкой жидкости актуальна в связи с необходимостью разработки методов управления режимами течения в промышленных конденсаторах и теплообменных устройствах. Данные устройства играют важную роль во множестве технологических процессов (от производства пищевых продуктов до обработки материалов), эффективность которых напрямую зависит от того, какой режим течения в них установится. Осознание важности как ламинарных, так и турбулентных режимов течения приводит к необходимости балансировки между энергетической эффективностью, которая часто предпочтительна для ламинарного режима, и эффективностью тепломассопереноса, характерной для турбулентного режима. Это обуславливает значимость изучения и контроля устойчивости течения. При увеличении скорости течения жидкости ламинарное течение теряет устойчивость, и возникают возмущения, которые могут привести к формированию вторичного нелинейного режима, сохраняющего основные характеристики ламинарного течения, или к турбулизации потока, что, в свою очередь, может оказать существенное влияние на эффективность работы технических устройств. Хотя в настоящее время имеется множество работ по исследованиям устойчивости течения однородных жидкостей в каналах и их спектральных характеристик, часто упускается из виду важность учета перепадов температур. Однако именно зависимость вязкости жидкости от температуры играет существенную роль в определении закономерностей течения и требует дополнительного изучения. Несмотря на проводимые численные исследования устойчивости течения жидкостей, остается необходимость в сопоставлении экспериментальных данных с результатами численного моделирования для получения более полного понимания процессов, происходящих в системе. В связи с этим в рамках настоящей работы разработана и собрана экспериментальная установка кольцевого канала с целью проведения подробного экспериментального исследования устойчивости течения жидкости и последующего сопоставления полученных результатов с численным моделированием, что позволит получить более точные данные для дальнейшего улучшения проектирования и работы промышленных устройств.

Ключевые слова: термовязкая жидкость, устойчивость течения, кольцевой канал, экспериментальная установка

Experimental setup for researching the stability of fluid flow

A.A. Mukhutdinova*, **A.D. Nizamova***, **V.N. Kireev****, **S.F. Urmancheev***

*Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa, Russia

**Ufa University Science and Technology, Ufa, Russia

The problem of studying the stability of the flow of a thermoviscous liquid is relevant in connection with the need to develop methods for controlling flow regimes in industrial condensers and heat exchange devices. These devices play an important role in a variety of technological processes, from food production to materials processing, and their effectiveness is directly dependent on the flow regime they establish. Awareness of the importance of both laminar and turbulent flow regimes leads to the need to balance between energy efficiency, which is often preferable to laminar flow, and heat and mass transfer efficiency, which is characteristic of turbulent flow. This makes it important to study and control the stability of the flow. As the speed of fluid flow increases, laminar flow loses stability and disturbances arise, which can lead to the formation of a secondary nonlinear regime that preserves the main characteristics of laminar flow, or to flow turbulization, which in turn can have a significant impact on the efficiency of technical devices. Although a lot of work has been done to study the stability of the flow of homogeneous liquids in channels and their spectral characteristics, the importance of taking temperature differences into account is often overlooked. However, it is the dependence of liquid viscosity on temperature that plays a significant role in determining flow patterns and requires additional study. Despite the ongoing numerical studies of the stability of fluid flow, there remains a need to compare experimental data with the results of numerical modeling to obtain a more complete understanding of the processes occurring in the system. In this regard, within the framework of this work, an experimental setup of an annular channel was developed and assembled in order to conduct a detailed experimental study of the stability of fluid flow and subsequently compare the results obtained with numerical simulations, which will provide more accurate data for further improving the design and operation of industrial devices.

Keywords: thermoviscous liquid, flow stability, annular channel, experimental setup

1. Введение

Задача исследования устойчивости течения термовязкой жидкости имеет важное значение при разработке эффективных методов управления режимами течения в промышленных конденсаторах и теплообменных устройствах. В рамках различных технологических процессов как ламинарные, так и турбулентные режимы течения играют важную роль. Ламинарный режим важен с точки зрения энергетической эффективности, тогда как турбулентный режим предпочтителен при рассмотрении эффективности тепломассопереноса. Однако при увеличении скорости течения ламинарное движение теряет устойчивость, и возникают возмущения, которые могут привести к формированию вторичного нелинейного режима или к турбулизации потока.

Несмотря на множество исследований по устойчивости течения однородных жидкостей в каналах и анализу их спектральных характеристик [1–4], в большинстве случаев оставляют без внимания возможные перепады температур. Стоит отметить, что характер зависимости вязкости жидкости от температуры оказывает существенное влияние на закономерности течения [5].

В настоящее время также проводятся численные исследования устойчивости течения жидкостей в различных каналах [6–11], однако на данном этапе работы сопоставление результатов экспериментальных исследований с численными моделями не осуществлялось.

Основная цель настоящей работы — разработка, сборка и тестирование экспериментальной установки кольцевого канала для проведения экспериментального исследования устойчивости течения жидкости.

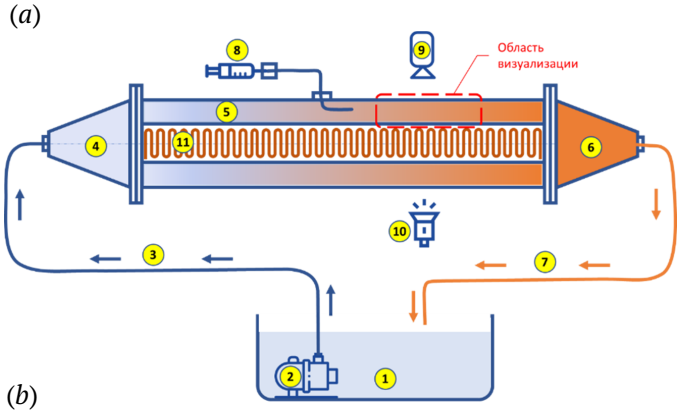
2. Экспериментальная установка

Для изучения и визуализации ламинарно-турбулентного перехода при течении термовязких жидкостей в кольцевом канале спроектирована и собрана экспериментальная установка, фотография и принципиальная схема которой показаны на рис. 1.

Основным элементом экспериментальной установки является кольцевой канал 5, образованный двумя соосными цилиндрическими трубами различных диаметров, расположенными горизонтально (рис. 2).

Вход в кольцевой канал для ламинаризации течения выполнен в виде конического диффузора 4 с углом раскрытия примерно 14°, а на выходе из канала установлен конический конфузор 6. Внешняя труба изготовлена из прозрачного оргстекла (акрил), имеет наружный диаметр 110 мм и толщину стенки 4 мм. Внутренняя труба, которая в собранной установке также изготовлена из прозрачного акрила (возможно использование труб из других материалов, таких как непрозрачное оргстекло, алюминий и др.), размещается и центрируется внутри внешней трубы с помощью пары специальных фиксаторов (рис. 3). Используя различные фиксаторы, можно устанавливать внутренние трубы различных диаметров от 20 до 90 мм, что позволит получить различные толщины кольцевых зазоров — от 6 до 41 мм.

(*a*)



(*b*)

Рис. 1. Фотография (*a*) и принципиальная схема (*б*) экспериментальной установки: 1 — емкость с жидкостью, 2 — погружной насос, 3 — подающая трубка, 4 — входной диффузор, 5 — кольцевой канал, 6 — выходной конфузор, 7 — сливная трубка,
8 — система подачи красящей жидкости, 9 — фотоаппарат, 10 — светодиодный осветитель, 11 — нагревательный элемент

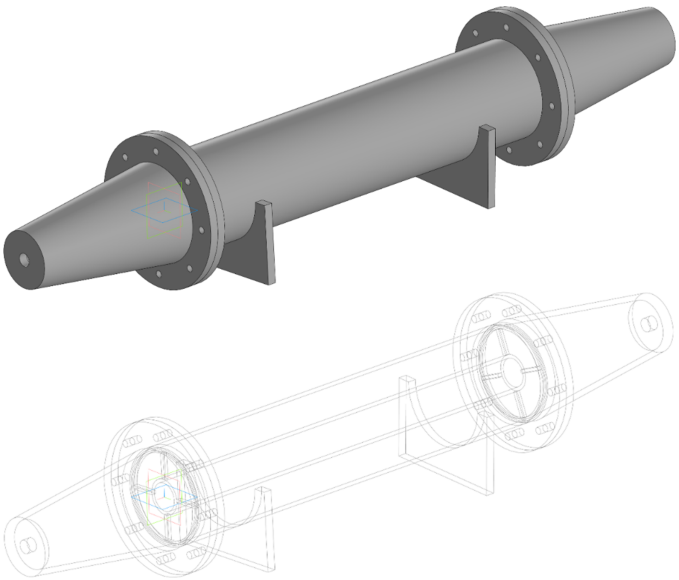


Рис. 2. 3D-модель и каркас кольцевого канала на подставках с установленными входным диффузором и выходным конфузором

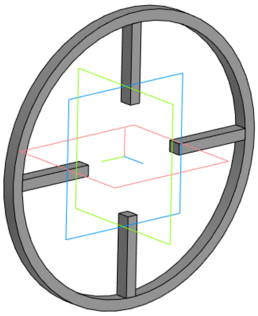


Рис. 3. Фиксатор внутренней трубы

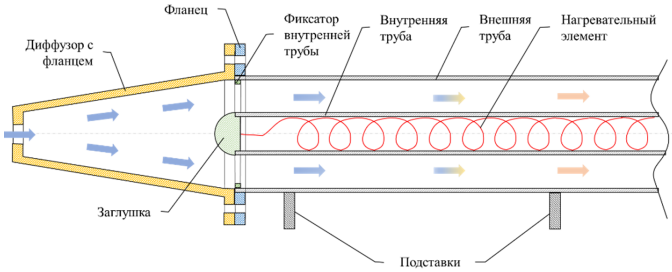


Рис. 4. Схема начального участка кольцевого канала

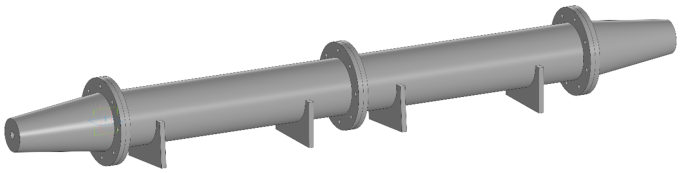


Рис. 5. Две секции кольцевого канала соединенные последовательно

Входной диффузор, выходной конфузор, фиксаторы, фланцы и подставки напечатаны из PLA-пластика методом послойного наплавления (FDM) на 3D-принтере «AnyCubic 4Max». Во внутренней трубе установлен нагревательный элемент 11 и с помощью терморегулятора можно поддерживать постоянную температуру нагрева до 70 °C. Температура жидкости в кольцевом канале измеряется с помощью нескольких термопар, установленных на различных расстояниях от входа в канал (на схеме не показаны). Через отверстие в стенке внешней трубы в кольцевом зазоре установлена игла устройства подачи красящей жидкости 8. Для визуализации течения красящей жидкости предназначена система фиксации, состоящая из светодиодного осветителя 10 и цифрового фотоаппарата 9.

На рис. 4 показана подробная схема начального участка кольцевого канала. В собранной установке использованы стандартные трубы из оргстекла длиной 2 м. Однако, в зависимости от условий проведения эксперимента, может потребоваться бóльшая длина кольцевого канала. Для этого можно последовательно соединить несколько труб с помощью фланцев (рис. 5). Общая схема работы экспериментальной установки: жидкость (водный раствор пропиленгликоля) из емкост 1 с помощью погружного насоса 2 через подающую трубку 3 и входной диффузор 4 подается в кольцевой канал 5.

(*a*)

(*b*)

Рис. 6. Фотография экспериментальной установки: полная сборка (*a*) и емкость с жидкостью (*b*)

После прохождения через кольцевой канал жидкость через выходной конфузор 6 и сливную трубку 7 попадает обратно в емкость 1.

Работа экспериментальной установки протестирована на воде в изотермическом (без нагрева) режиме для внутренней трубы диаметром 40 мм при различных производительностях насоса. Визуально удалось наблюдать и ламинарный, и турбулентный режимы течения.

Общий вид установки представлен на рис. 6. На верхней фотографии (рис. 6(*a*)) приведена полностью собранная и готовая к проведению исследований экспериментальная установка, а на нижней (рис. 6(*б*)) — емкость с водой или раствором пропиленгликоля.

В экспериментальную установку была внесена дополнительная оснастка для улучшения ее функциональных качеств: внутренняя труба была оснащена дополнительной трубкой с намотанным на нее греющим кабелем для нагрева потока жидкости, как показано на рис. 7. Греющий кабель обладает высокой теплопроводностью и способен нагревать и поддерживать постоянную температуру внутри трубы в течение всего эксперимента. Регулировка электрического тока в кабеле позволяет точно контролировать температуру жидкого потока, что является ключевым аспектом эксперимента.

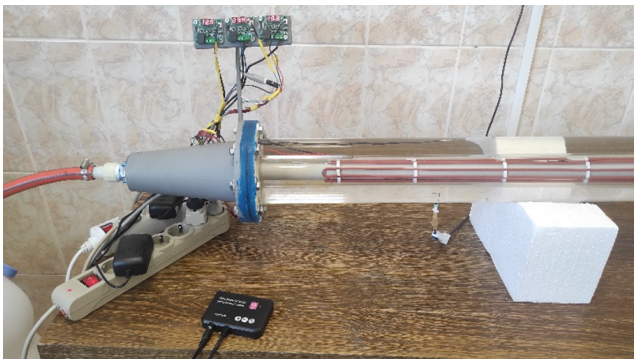


Рис. 7. Фотография части экспериментальной установки

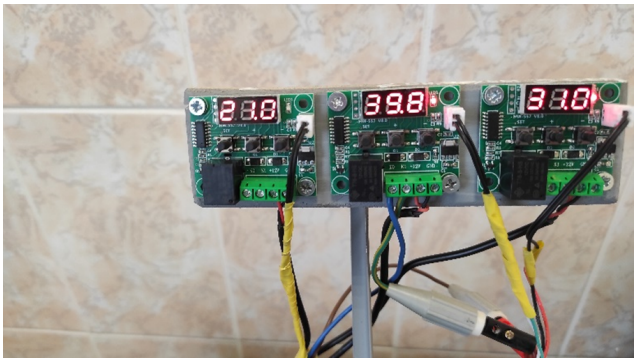


Рис. 8. Фотография термостатов экспериментальной установки

Добавлены три цифровых термостата XH-W1209 с выносным датчиком для контроля температуры в процессе охлаждения и нагрева жидкости, которые представлены на рис. 8. Используются три терморезистора, каждый из которых измеряет температуру на разных участках системы. Первый терморезистор расположен на внутренней поверхности наружной трубы и позволяет контролировать температуру наружной стороны системы. Второй терморезистор размещен на внешней поверхности внутренней трубы и измеряет температуру внутри жидкости, окружающей внутреннюю трубу. Третий терморезистор расположен внутри внутренней трубы, этот датчик измеряет температуру греющего кабеля. С помощью этих трех терморезисторов можно контролировать температуру на различных участках системы.

Для визуализации изменения характера потока была использована конструкция, включающая инфузионную систему и емкость, предназначенные для равномерной подачи жидкости в основной поток (рис. 9(*а*)), а также медицинскую иглу (рис. 9(*б*)). Опыты проводились с иглами как со стандартным косым срезом, так и с прямым срезом (рис. 10). Для подачи жидкости по потоку были предварительно изогнуты иглы под углом 90 градусов.

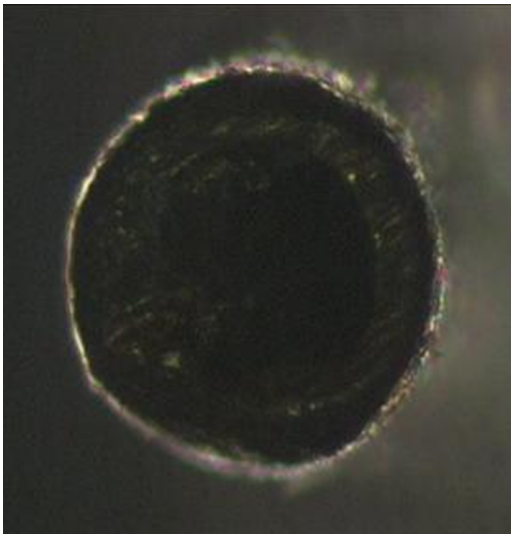
(*а*)

(*б*)

Рис. 9. Фотография составных частей экспериментальной установки: инфузионная система и емкость для равномерной подачи жидкости в основной поток (*а*), медицинская игла (*б*)

3. Заключение

В настоящей работе была разработана и собрана экспериментальная установка кольцевого канала с целью проведения экспериментального исследования устойчивости течения жидкости. Это позволит сопоставить результаты экспериментов и численного моделирования, обеспечивая более полное понимание процессов, происходящих в системе, и создавая основу для дальнейшего усовершенствования технологий теплообмена и управления течением в промышленных приложениях.



(*а*)

(*б*)

(*в*)

Рис. 10. Фотографии: прямой срез иглы (*а*), игла с прямым срезом (*б*), электронный микроскоп (*в*)

Список литературы / References

[1] Petukhov B.S. Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties // Advances in Heat Transfer. 1970. V. 6. P. 503–564.
DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70153-9

[2] Orszag S.A. Accurate solution of the Orr–Sommerfeld equation // J. of Fluid Mech. 1971. V. 50, Iss. 4. P. 689–703.
DOI: 10.1017/S0022112071002842

[3] Шкаликов А.А. Спектральные портреты оператора Орра–Зоммерфельда при больших числах Рейнольдса // Труды международной конференции по дифференциальным и функционально-дифференциальным уравнениям — сателлита Международного конгресса математиков ICM-2002 (Москва, МАИ, 11–17 августа 2002). Часть 3. СМФН. 2003. Т. 3. С. 89–112.
MathNet: cmfd17
Shkalikov A.A. Spectral portraits of the Orr–Sommerfeld operator for large Reynolds numbers // Journal of Mathematical Sciences. 2004. V. 124, No. 6. P. 5417–5441.
DOI: 10.1023/B:JOTH.0000047362.09147.c7

[4] Скороходов С.Л. Численный анализ спектра задачи Орра–Зоммерфельда // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2007. Т. 47, № 10. С. 1672–1691.
EDN: IARDQF
Skorohodov S.L. Numerical analysis of the spectrum of the Orr–Sommerfeld problem // Computational mathematics and mathematical physics. 2007. V. 47, Iss. 10. P. 1603–1621.
DOI: 10.1134/S096554250710003X

[5] Урманчеев С.Ф., Киреев В.Н. Установившееся течение жидкости с температурной аномалией вязкости // Доклады академии наук. 2004. Т. 396, № 2. С. 204–207.
EDN: OPSUST
Urmancheev S.F., Kireev V.N. Steady flow of a fluid with an anomalous temperature dependence of viscosity // Doklady Physics. 2004. V. 49, No. 5. P. 328–331.
DOI: 10.1134/1.1763627

[6] Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчеев С.Ф. Устойчивость течения термовязкой жидкости в канале теплообменника // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 72.
Nizamova A.D., Kireev V.N., Urmancheev S.F. [Stability of thermoviscous fluid flow in the heat exchanger channel] Multiphyse systems. 2020. V. 15, No. 1–2. P. 72 (in Russian).
DOI: 10.21662/mfs2020.1-2

[7] Киреев В.Н., Низамова А.Д., Урманчеев С.Ф. Некоторые особенности гидродинамической неустойчивости течения термовязкой жидкости в плоском канале // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83, № 3. С. 454–459.
Kireev V.N., Nizamova A.D., Urmancheev S.F. [Some features of the hydrodynamic instability of the flow of a thermally viscous fluid in a flat channel] Prikladnaya mexanika i matematika. 2019. V. 83, No. 3. P. 454–459 (in Russian).
DOI: 10.1134/S003282351903007X

[8] Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчеев С.Ф. Влияние параметров течения термовязкой жидкости в кольцевом канале на изменение критического числа Рейнольдса // Многофазные системы. 2023. Т. 18, № 3. С. 150–151.
Nizamova A.D., Kireev V.N., Urmancheev S.F. [Influence of flow parameters of a thermoviscous fluid in an annular channel on the change in the critical Reynolds number] Multiphyse systems. 2023. V. 18, No. 3. P. 150–151 (in Russian).
DOI: 10.21662/mfs2023.3.038

[9] Nizamova A.D., Kireev V.N., Urmancheev S.F. Influence of Temperature Dependence of Viscosity on the Stability // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023 V. 44, No. 5 P. 1778–1784.
DOI: 10.1134/S1995080223050463

[10] Куликов Ю.М., Сон Э.Е Об устойчивости течения термовязкой жидкости в канале // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 6. С. 909–928.
EDN: ZXYFTD
Kulikov Y.M., Son E.E. On stability of channel flow of thermoviscous fluid // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. Т. 24, No. 6. С. 883–900.
DOI: 10.1134/S0869864317060075

[11] Куликов Ю.М., Сон Э.Е Режимы течения термовязкой жидкости в плоском неизотермическом слое // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 6. С. 877–898.
EDN: VSCMUG
Kulikov Y.M., Son E.E. Thermoviscous fluid flow modes in a plane nonisothermal layer // Thermophysics and Aeromechanics. 2018. V. 25, № 6. P. 845–864.
DOI: 10.1134/S0869864318060069

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

Аделина Димовна Низамов
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

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

Саид Федорович Урманчеев
д.ф.-м.н.
Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Said F. Urmancheev
Sc.D. (Physics & Mathematics)
Mavlyutov Institute of Mechanics, UFRS RAS, Ufa, Russia
said52@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1570-5148