

ISSN 1561-8323 (print)

УДК 532.516; 532.5; 629.9:662.92

Поступило в редакцию 18.09.2017

Received 18.09.2017

В. Д. Тютюма*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***О ТЕПЛООБМЕНЕ В СДВИГОВОМ ЛАМИНАРНОМ ПОТОКЕ
МЕЖДУ ВРАЩАЮЩИМИСЯ КОАКСИАЛЬНЫМИ ЦИЛИНДРАМИ***(Представлено академиком А. А. Михалевичем)*

Аннотация. Экспериментально изучен теплообмен в ламинарном потоке в зазоре между вращающимся и неподвижным коаксиальными цилиндрами. Эксперимент показал, что подвод внешнего тепла, а также разогрев установки за счет диссипации практически не влияют на распределение избыточного давления в щелевом зазоре. Полученный результат указывает на автомодельный режим изменения температуры в движущейся воздушной среде. В ходе экспериментов на графиках зависимости температуры от времени при переменной скорости вращения внутреннего цилиндра были обнаружены угловые точки, при переходе через которые наблюдается аномальное изменение температуры. При увеличении скорости вращения внутреннего цилиндра возникают аномалии лямбда-типа. При замедлении, наоборот, происходит V-образный разворот. Наличие угловых точек, где первая производная температуры по времени терпит разрыв первого рода, указывает на существование скачкообразных переходов в закономерностях теплообмена при переходе скорости вращения внутреннего цилиндра через некоторое критическое значение. По замерам при увеличении и уменьшении скорости вращения переход наступал примерно в диапазоне одних и тех же угловых скоростей $545\text{--}650\text{ с}^{-1}$. Числа Рейнольдса и Тейлора, соответствующие указанным скоростям вращения, соответственно равны $Re = 245\text{--}293$ и $Ta = 22\text{--}26$, что намного меньше критического числа Рейнольдса $Re_{кр} = 3960$ перехода ламинарного течения в турбулентное и критического числа $Ta_{кр} = 41,3$ потери устойчивости с возникновением вихрей Тейлора. Возникновение разрывов объясняется изменением кинетики межмолекулярных взаимодействий в связи с переходом от молекулярного к фононному механизму переноса.

Ключевые слова: теплообмен в ламинарном потоке, переходные процессы теплообмена, коаксиальные цилиндры, числа Рейнольдса перехода, числа Тейлора перехода, молекулярный механизм переноса, фононный механизм переноса

Для цитирования: Тютюма, В. Д. О теплообмене в сдвиговом ламинарном потоке между вращающимися коаксиальными цилиндрами / В. Д. Тютюма // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 6. – С. 123–128.

Vladimir D. Tyutyuma*Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***HEAT TRANSFER IN A SHEAR LAMINAR FLOW BETWEEN ROTATING COAXIAL CYLINDERS***(Communicated by Academician Aliksandr A. Mikhalevich)*

Abstract. Heat transfer in a laminar flow in a gap between rotating and motionless coaxial cylinders has been studied experimentally. The experiment showed that supply of external heat and heating-up of the setup due to dissipation do not practically influence the distribution of excess pressure in a slot gap. The result obtained points to a self-similar mode of temperature variation in a moving air medium. In the course of the experiments, angular points, on passing which the anomalous variation of temperature occurs, were found on the graphs of temperature dependence on time with a variable rotation speed of the inner cylinder. The lambda-type anomalies originate as the rotation speed of the inner cylinder increases. On the contrary, as the speed decreases, a V-shaped turn takes place. The presence of angular points, where the first time derivative of temperature undergoes the first-kind discontinuity, indicates the existence of jumpwise transitions in the laws that govern heat transfer when the rotation speed of the inner cylinder passes through a critical value. According to measurements, as the rotation speed increases or decreases the transition takes place approximately in the range of the same angular speeds $545\text{--}650\text{ s}^{-1}$. The Reynolds and Taylor numbers that correspond to the indicated rotation speeds are $Re = 245\text{--}293$ and $Ta = 22\text{--}26$, which is much lower than the critical Reynolds number $Re_{cr} = 3960$ for the laminar-to-turbulent flow transition and the critical Taylor number $Ta_{cr} = 41.3$ for the stability loss with origination of Taylor vortices. The appearance of discontinuities is explained by the change in the kinetics of intermolecular interactions caused by a transition from a molecular to phonon mechanism of transfer.

Keywords: heat transfer in a laminar flow, processes of transient heat transfer, coaxial cylinders, transition Reynolds numbers, transition Taylor numbers, molecular mechanism of transfer, phonon mechanism of transfer

For citation: Tyutyuma V. D. Heat transfer in a shear laminar flow between rotating coaxial cylinders. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 6, pp. 123–128 (in Russian).

Введение. Для обоснования теории течения вязких сжимаемых сред решающее значение имеют экспериментальные исследования тепловых и гидродинамических процессов в сдвиговом потоке между вращающимися коаксиальными цилиндрами [1]. Обычно процессы выравнивания в неравновесных системах ассоциируются с межмолекулярными взаимодействиями, кинетическое описание которых базируется на уравнении Больцмана [2]. Между тем наблюдаемые гидродинамические явления дают основания предположить, что с увеличением напряжений сдвига передача импульса и энергии осуществляется не столько за счет прямых молекулярных столкновений, сколько за счет переноса этих величин фонами. На феноменологическом уровне фонный механизм переноса проявляется в виде дополнительных ограничений на изменение макроскопических параметров системы. Для уравнения импульсов такое дополнительное условие сводится к приравнению скорости распространения импульса локальной скорости звука [3], которое нашло экспериментальное подтверждение при измерении давления в зазоре между вращающимися цилиндрами [4]. Очевидно, что фонный механизм переноса должен оказывать определенное влияние и на распространение энергии в движущейся среде. Однако до настоящего времени нет ясного понимания механизма такого влияния на протекание тепловых процессов в сдвиговых потоках вязкой сжимаемой среды [5]. В представленной работе приводятся результаты экспериментальных исследований теплообмена в сдвиговом ламинарном потоке между коаксиальными вращающимися цилиндрами, в ходе которых в закономерностях теплообмена были обнаружены скачкообразные переходные процессы. Возникновение аномальных точек на диаграмме изменения температуры во времени, где производная от температуры по времени терпит разрыв первого рода, объясняется переходом кинетики межмолекулярных взаимодействий от молекулярного к фонному механизму переноса.

Некоторые особенности теплообмена в зазоре между вращающимися цилиндрами. Казалось бы, экспериментальную проверку теоретических выводов, полученных в [1], можно осуществить достаточно просто. Для этого необходимо с помощью внешнего источника нагреть в определенном поперечном сечении воздушную среду в зазоре между вращающимися цилиндрами и измерить вызываемые нагревом изменения температуры и давления. Однако результаты уже пробных экспериментов показали, что попытка увеличения давления в зазоре за счет нагрева не приводит к желаемому результату. Подвод внешнего тепла, а также разогрев установки за счет диссипации практически не сказывается на величине избыточного давления в точках измерения. Оказалось, что давление в зазоре большей частью зависит только от скорости вращения внутреннего цилиндра и конфигурации установки. Хотя в отдельных случаях в определенных условиях в результате теплового воздействия отмечались достаточно сильные кратковременные пульсации давления.

На первый взгляд, полученные результаты не согласуются с выводами теории, учитывающей фонный механизм переноса импульса. В то же время можно предположить, что подобное поведение системы связано с некоторыми дополнительными ограничениями на перенос энергии, которые приводят к возникновению автотемпературного режима нагрева воздуха в зазоре между цилиндрами, при котором в каждой точке температура изменяется на одну и ту же величину, не нарушая сложившегося распределения температурного поля. Для того чтобы прояснить ситуацию было измерено распределение температуры в воздушном зазоре и ее изменение во времени при работе экспериментальной установки в режиме нагрева за счет тепла диссипации.

Методика проведения эксперимента и результаты измерений. Принципиальная схема экспериментальной установки была уже описана в [4]. Она включает в себя два коаксиально расположенных цилиндра, из которых внешний неподвижен, а внутренний вращается с регулируемой скоростью. Отличие заключается в том, что ширина зазора между цилиндрами в данном случае составляет $h = 240 \pm 5$ мкм. Дополнительно вблизи дренажных отверстий статического

давления на тех же расстояниях от верхнего среза и на расстоянии 10 мм по ходу вращения внутреннего цилиндра в корпусе были просверлены отверстия для установки термопар. В качестве датчиков температуры использовались хромель-копелевые (ТХК) термопары. Всего было установлено шесть термопар (по три в двух поперечных сечениях). Для измерения ЭДС термопар использовалась система автоматического сбора и обработки экспериментальных данных в режиме реального времени. Точность измерения температуры составляла $\pm 0,01$ К. Частота вращения внутреннего цилиндра регистрировалась цифровым стробоскопическим тахометром Testo 465 с диапазоном измерений от 1 до 100000 об/мин, систематическая погрешность измерения которого составляет $\pm 0,02$ % от измеренного значения.

Угловая скорость вращения внутреннего цилиндра ω изменялась от нуля до 1400 с^{-1} . При этом максимальное значение числа Рейнольдса не превышало $Re = h\omega r_1 / \nu = 676$, что намного меньше критической величины $Re_{кр} = 3960$ перехода ламинарного течения в турбулентное [6]. Таким образом, движение воздуха в зазоре в ходе эксперимента поддерживалось ламинарным.

Эксперимент проводился в следующей последовательности. Включалась система контроля термопар с выводом данных на экран монитора. Параллельно измеряемые параметры вносились в базу данных для их дальнейшего анализа и обработки. В фиксированный момент времени запускался электродвигатель и начиналась раскрутка внутреннего цилиндра. При этом проводилось непрерывное измерение угловой скорости его вращения до момента достижения величины порядка 1400 с^{-1} . Момент запуска электродвигателя и время установления скорости вращения фиксировались. В результате диссипации механической энергии в щелевом зазоре и тепла, выделяемого электродвигателем, установка нагревалась. После определенного периода работы электродвигатель выключался. При этом фиксировалось время выключения электродвигателя и момент полной остановки внутреннего цилиндра.

На рис. 1 и 2 представлены временные зависимости показания одной из термопар, которые были получены при последовательных запусках и остановках вращения внутреннего цилиндра на прогретой установке.

Важной особенностью полученных диаграмм является наличие угловых точек M и N , при переходе через которые температура термопары начинает аномально изменяться. На рис. 2 представлен график температуры термопары за один полный цикл. Как видно из представленных графиков около точки N наблюдается аномалия лямбда-типа. Около точки M , наоборот, возникает V -образный разворот.

Аномальное поведение температуры в точке N проявляется в том, что после начала вращения внутреннего цилиндра температура сначала повышается, но после перехода через точку N , несмотря на увеличение угловой скорости вращения и, следовательно, увеличение тепловыделения в зазоре между цилиндрами, температура начинает резко уменьшаться. Падение температуры продолжается даже после выхода цилиндра на установившийся режим вращения.

При прохождении через точку M при выключенном электродвигателе падение температуры сменяется ростом, который продолжается даже после остановки вращения цилиндра.

Наличие угловых точек, где производные от температуры по времени терпят разрыв первого рода, свидетельствуют о скачкообразном изменении процессов теплообмена в движущейся воздушной среде в зазоре. Попытаемся разобраться в причинах возникновения этих скачкообразных переходов.

Экспериментальные исследования теплообмена в слое воздуха, движущемся в зазоре между цилиндрами, толщиной порядка 240 мкм сопряжены с определенными трудностями из-за сложности измерения температуры. В эксперименте использовались термопары, диаметры измерительных спаев которых более чем в два раза превышали ширину воздушного зазора. Поэтому термопары, не касаясь стенок, утапливались в глубь алюминиевого корпуса установки как это показано на рис. 3. Таким образом, каждая термопара термически контактирует не только с воздушной прослойкой в зазоре между цилиндрами, но и с воздушной средой в полости корпуса установки. Источниками тепловыделения являются диссипативные процессы в сдвиговом воздушном потоке в зазоре и отчасти тепло, поступающее от обмоток электродвигателя. Генерируемое в сдвиговом потоке тепло передается корпусу установки и рассеивается в окружающую среду. При проведении

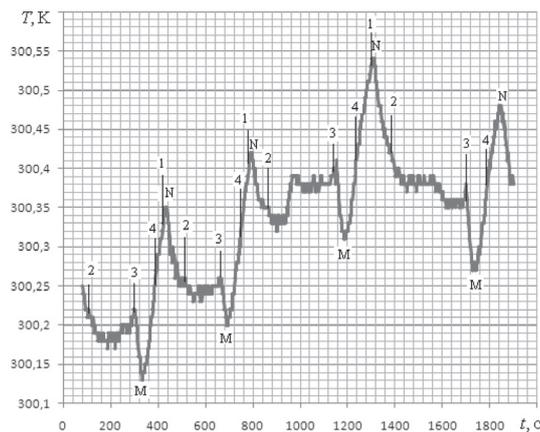


Рис. 1. Изменение температуры термопары во времени ($z_B = 0,25$): 1 – момент включения электродвигателя; 2 – выход угловой скорости цилиндра на установившийся режим вращения ($\omega = 1400 \text{ с}^{-1}$); 3 – выключение электродвигателя; 4 – момент остановки цилиндра

Fig. 1. Change of thermocouple temperature with time ($z_B = 0,25$): 1 – instant of electric engine start-up; 2 – instant when the cylinder angular velocity reaches the steady-state regime of rotation ($\omega = 1400 \text{ s}^{-1}$); 3 – electric engine switch off; 4 – instant of cylinder halt

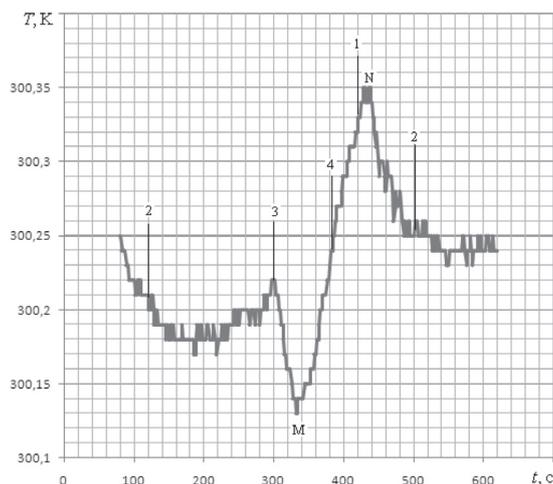


Рис. 2. Изменение температуры термопары во времени за один полный цикл ($z_B = 0,25$): 1 – момент включения электродвигателя; 2 – выход угловой скорости цилиндра на установившийся режим вращения ($\omega = 1400 \text{ с}^{-1}$); 3 – выключение электродвигателя; 4 – момент остановки цилиндра

Fig. 2. Change of thermocouple temperature with time during one full cycle ($z_B = 0,25$): 1 – instant of electric engine start-up; 2 – instant when the cylinder angular velocity reaches the steady-state regime of rotation ($\omega = 1400 \text{ s}^{-1}$); 3 – electric engine switch off; 4 – instant of cylinder halt

эксперимента временные интервалы между включением и выключением подобраны таким образом, чтобы не наступало выравнивание температур воздуха в зазоре и в воздушной полости корпуса. Поэтому температура движущейся воздушной среды в зазоре всегда выше температуры корпуса и температуры воздуха в полости, где размещены термопары. В этих условиях показания термопары всецело определяются интенсивностью ее теплообмена с каждой из областей.

На участках диаграммы (рис. 2), расположенных между точками *M* и *N*, скорость вращения внутреннего цилиндра незначительна. В интервале от 4 до 1 цилиндр вообще не вращается. Следовательно, эта область соответствует небольшим напряжениям сдвига и незначительному тепловыделению в сдвиговом потоке в зазоре между цилиндрами. Однако несмотря на это, температура термопары на этих участках монотонно увеличивается.

На участках диаграммы, расположенных между точками *N* и *M*, скорость вращения внутреннего цилиндра значительно выше. В интервале от 2 до 3 цилиндр вращается с максимальной

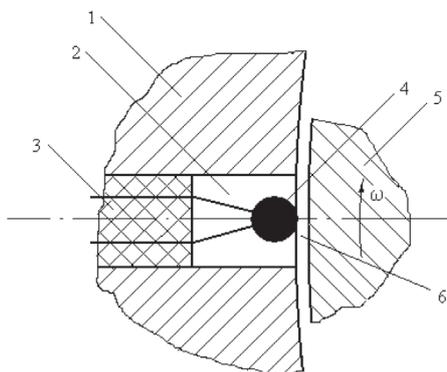


Рис. 3. Примерная схема размещения термопар в корпусе экспериментальной установки: 1 – корпус наружного неподвижного цилиндра; 2 – воздушная полость в корпусе; 3 – изолирующая вставка; 4 – термопара; 5 – внутренний вращающийся цилиндр; 6 – область сдвигового течения воздушной среды в зазоре между цилиндрами

Fig. 3. Approximate scheme of the position of thermocouples in the body of the experimental setup: 1 – body of the outer motionless cylinder; 2 – air cavity in the body; 3 – insulating insert; 4 – thermocouple; 5 – inner rotating cylinder; 6 – region of air medium shear flow in the gap between the cylinders

скоростью. Эта область соответствует большим напряжениям сдвига и значительному тепловыделению в сдвиговом потоке. Однако температура на этих участках немонотонно уменьшается.

Как видно из представленных графиков, скачкообразное изменение теплообмена возникает и при выключении электродвигателя (точка 3 на графике). Однако переход в этом случае обусловлен внешними причинами и связан со снижением тепловыделения в результате уменьшения скорости вращения цилиндра и прекращением поступления тепла от электродвигателя.

При переходе же через точки *M* и *N* температура самопроизвольно изменяется противоположно внешним воздействиям. Такое поведение системы возможно только в результате перестройки кинетики внутренних взаимодействий в сдвиговом потоке, которая и приводит к существенному скачкообразному изменению теплообмена термопары с движущейся средой при переходе скорости вращения внутреннего цилиндра, а следовательно, и величины напряжения сдвига, через некоторое критическое значение.

На участках диаграммы между точками *M* и *N* скорость вращения цилиндра, а следовательно, и скорость потока не превышают критического значения. Процессы переноса в этом случае осуществляются в результате прямых межмолекулярных столкновений. Теплообмен термопары с воздушной средой в зазоре интенсивен. В этой ситуации термопара фиксирует большей частью температуру воздуха в зазоре. А поскольку она выше температуры корпуса установки термопара разогревается и фиксирует рост температуры.

При переходе через точку *M* скорость течения становится выше критической. Кинетика внутренних взаимодействий меняется. В потоке начинает превалировать фоновый механизм переноса. При этом теплообмен термопары с движущимся в зазоре воздухом значительно ослабевает, преобладающим становится тепловое взаимодействие с воздушной средой в полости корпуса установки и температура термопары начинает снижаться.

По диаграмме можно оценить минимальную разность между температурами корпуса и воздуха в зазоре. Она равна примерно разности температур между точками *M* и *N* и составляет около 0,23 К.

В процессе проведения экспериментов фиксировалась скорость вращения внутреннего цилиндра в переходных точках *M* и *N*. При ускорении и замедлении значения угловой скорости вращения цилиндра в этих точках примерно совпадали. По замерам переход наступал примерно в диапазоне угловых скоростей 545–650 с⁻¹. Числа Рейнольдса и Тейлора, соответствующие указанным скоростям вращения, соответственно равны $Re = 245\text{--}293$ и $Ta = 22\text{--}26$, что намного меньше критического числа Рейнольдса $Re_{кр} = 3960$ перехода ламинарного течения в турбулентное и критического числа $Ta_{кр} = 41,3$ потери устойчивости с возникновением вихрей Тейлора.

Следует заметить, что ламинарный устойчивый режим течения снижает вероятность возникновения наблюдаемых переходных процессов за счет шероховатости цилиндров, вибраций и других возмущений, которые, как правило, проявляются в режиме развитой турбулентности.

Отклонения стохастического характера за счет флуктуаций исключаются синхронными показаниями температуры всех шести термопар, а также большими характерными временами (порядка минуты) изменения температуры.

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований термогидродинамических процессов в сдвиговом ламинарном потоке между вращающимися коаксиальными цилиндрами установлено, что подвод внешнего тепла, а также разогрев установки за счет диссипации практически не сказывается на распределении давления в зазоре, что указывает на автомодельный режим нагрева движущейся воздушной среды.

Для процессов теплообмена в ламинарном потоке вязкой среды экспериментально обнаружены скачкообразные переходы, возникновение которых можно связать с изменением кинетики межмолекулярных взаимодействий, обусловленных переходом от молекулярного к фононному механизму переноса. Экспериментально установлено, что теплообмен твердой поверхности с движущейся воздушной средой при фононном взаимодействии заметно снижается по сравнению с молекулярным переносом.

В теоретическом плане проведенные исследования показывают, что при больших напряжениях сдвига при феноменологическом описании процессов переноса импульса и энергии необходимо вносить поправки, учитывающие изменение кинетики внутренних взаимодействий в связи с переходом от молекулярного к фононному механизму переноса.

Полученные результаты могут послужить основой для создания новых технических устройств и камер вихревого типа, а также найти практическое применение при разработке высокоскоростных радиальных подшипников скольжения.

Список использованных источников

1. Тютюма, В. Д. Решение тепловой задачи в сдвиговом потоке локально-неравновесного течения вязкой жидкости / В. Д. Тютюма // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 4. – С. 106–109.
2. Коган, М. Н. Динамика разреженного газа / М. Н. Коган. – М.: Наука, 1967. – 440 с.
3. Тютюма, В. Д. Концептуальные особенности построения теории вязких течений сжимаемых сред / В. Д. Тютюма // Инженерно-физический журн. – 2012. – Т. 85, № 2. – С. 333–335.
4. Тютюма, В. Д. Экспериментальное подтверждение модели локально-неравновесного течения вязкой жидкости / В. Д. Тютюма // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 6. – С. 107–111.
5. Бурцев, С. А. Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор) / С. А. Бурцев, А. И. Леонтьев // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 2. – С. 310–322.
6. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

References

1. Tyutyuma V. D. Solution of a thermal problem in a shear locally nonequilibrium viscous fluid flow. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2014, vol. 58, no. 4, pp. 106–109 (in Russian).
2. Kogan M. N. *The Dynamics of the Rarefied Gases*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 440 p. (in Russian).
3. Tyutyuma V. D. Conceptual features in the construction of the theory of compressible media flows. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 2, pp. 356–358. doi.org/10.1007/s10891-012-0660-7
4. Tyutyuma V. D. Experimental confirmation of the model of locally nonequilibrium viscous fluid flow. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2014, vol. 58, no. 6, pp. 107–111 (in Russian).
5. Burtsev S. A., Leontiev A. I. Study of the influence of dissipative effects on the temperature stratification in gas flows (Review). *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 297–307. doi.org/10.1134/s0018151x13060060
6. Schlichting H. *Boundary Layer Theory*. 6th ed., Mc Graw-Hill, New York, 1968. 730 p.

Информация об авторе

Тютюма Владимир Дмитриевич – канд. техн. наук, заведующий лабораторией. Институт энергетики НАН Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tvd@hmti.ac.by.

Information about the author

Tyutyuma Vladimir Dmitryevich – Ph. D. (Engineering), Head of Laboratory. Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Akademicheskaya Str., building 2, 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tvd@hmti.ac.by.