

УДК 532.516; 620.9

В. Д. ТЮТЮМА

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МОДЕЛИ ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

(Представлено академиком А. А. Михалевичем)

Институт энергетики НАН Беларуси, Минск

Поступило 03.12.2014

**Введение.** Многие проблемы теории вязких течений носят концептуальный характер и не могут быть решены в рамках существующего подхода к описанию тепловых и механических процессов в потоках вязкой жидкости. Существенный недостаток современной теории движения вязкой среды заключается в том, что в ней не учитываются некоторые важные физические особенности взаимовлияния различных процессов в движущемся элементарном объеме. Это характерно, прежде всего, для напорных течений при отсутствии массовых сил, где движущийся поток порождает звуковые волны, которые, распространяясь и взаимодействуя друг с другом, оказывают обратное влияние на параметры течения. В этом случае движущаяся среда уже не может рассматриваться как единая термодинамическая система, подчиняющаяся одним и тем же закономерностям [1].

В настоящее время для описания течения вязкой сжимаемой среды построены две теоретические модели – система уравнений Навье–Стокса [2–4] и предложенная в [5] замкнутая система дифференциальных уравнений, учитывающая волновой механизм передачи упругих взаимодействий в движущейся среде.

Для убедительного подтверждения теории в том или ином случае необходим эксперимент, который позволил бы наиболее ярко отразить принципиальные различия между двумя концептуальными подходами к построению физической и математической модели движения вязкой сжимаемой среды. Концептуальная сторона постановки такого решающего эксперимента рассматривалась в [6]. В основу эксперимента было предложено положить характерные для каждой модели особенности развития тепловых процессов при выделении тепла диссипации в сдвиговом течении Куэтта между двумя плоскими параллельными стенками. Уникальность постановки такого эксперимента заключается в том, что в нем различия между двумя теоретическими моделями проявляются наиболее ярко, так как разные подходы предсказывают совершенно противоположные результаты, взаимно исключающие друг друга.

**Теоретическое обоснование эксперимента.** Проведение эксперимента с использованием плоского течения Куэтта между двумя параллельными плоскостями сопряжено с определенными техническими трудностями его реализации. Практически сдвиговое течение более просто осуществить в зазоре между двумя вращающимися коаксиальными цилиндрами. Приведем некоторые результаты анализа такого течения в зазоре между внешним неподвижным и внутренним вращающимся цилиндром с учетом тепла диссипации на основе двух указанных выше теоретических моделей течения вязкой жидкости.

Выражение для распределения давления в щелевом зазоре, на основе уравнений Навье–Стокса, в плоском случае получено в [6]. Распределение давления в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами конечной длины  $b$ , один из которых внутренний вращается с угловой скоростью  $\Omega_1$ , имеет более сложный вид

$$p_2 = p_0 \exp \frac{Q}{RT(z)}; \quad Q = \frac{r_1^4 \Omega_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 + \frac{4r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2^2}{r_1^2} \right).$$

Анализ этой зависимости показал, что при малой ширине зазора между цилиндрами величина избыточного давления, возникающего за счет центробежной силы, является пренебрежимо малой и составляет по порядку величины  $10^{-3}$  Па. Поэтому давление в узком зазоре с большой степенью точности можно принять постоянным, равным давлению окружающей среды и независимым от распределения температуры. Таким образом, на основании полученного решения можно сделать вывод о том, что движение жидкости в зазоре между цилиндрами является баротропным.

Решение этой же задачи в приближении локально-неравновесного течения [5] приводит к зависимости

$$\rho_2 = \rho_0 = \text{const}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – плотность окружающей среды.

Интегрирование уравнения энергии с учетом тепла диссипации при граничных условиях

$$T|_{z=0} = T_0; T|_{z=b} = T_0$$

для распределения температуры дает решение

$$T(z) = T_0 + \frac{4k\mu b^2}{\lambda r_1^2 r_2^2} \left( \frac{r_1^2 r_2^2 \Omega_1}{r_2^2 - r_1^2} \right)^2 \frac{z}{b} \left( 1 - \frac{z}{b} \right). \quad (2)$$

В этой формуле коэффициент  $k$  – неизвестный эмпирический параметр задачи, учитывающий влияние потерь тепла через стенки цилиндрических поверхностей.

Подставив выражения (1) и (2) в уравнение состояния

$$p = \rho RT,$$

для распределения давления внутри щелевого зазора получим выражение

$$p(z) = p_0 \left( 1 + \frac{4k\mu b^2}{\lambda r_1^2 r_2^2 T_0} \left( \frac{r_1^2 r_2^2 \Omega_1}{r_2^2 - r_1^2} \right)^2 \frac{z}{b} \left( 1 - \frac{z}{b} \right) \right), \quad (3)$$

где  $p_0$  – давление окружающей среды.

Таким образом, в локально-неравновесном случае течение в зазоре между цилиндрами носит изохорный характер, а температура и давление внутри зазора из-за диссипации механической энергии увеличиваются и превышают значения температуры и давления в окружающей среде. Причем давление и температура растут с увеличением скорости вращения цилиндра по параболическому закону.

**Методика проведения эксперимента и результаты измерений.** Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она включает в себя неподвижный цилиндр 2, который одновременно является и корпусом, в котором посредством фланца 5 закреплен электродвигатель 3. На выходном валу электродвигателя насажен вращающийся цилиндр 1. В точках А, В, С, расположенных через  $120^\circ$  по длине окружности внешнего цилиндра, вдоль образующих просверлены по три дренажных отверстия  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$ , которые предназначены для замера давления в зазоре между цилиндрами. Отверстия от верхнего среза просверлены на расстояниях, которые составляют 0,25; 0,5 и 0,75 высоты внутреннего цилиндра. Для подсоединения соединительных шлангов отверстия снабжены штуцерами, которые на схеме не показаны. Юстировка соосности цилиндров осуществляется тремя регулировочными винтами 4, которые установлены через  $120^\circ$  по длине окружности корпуса установки. Диаметр вращающегося цилиндра по результатам замеров составлял  $D_1 = 60,05^{\pm 0,01}$  мм, высота равнялась  $40^{\pm 0,1}$  мм. Внутренний диаметр неподвижного цилиндра равен  $60,1^{\pm 0,01}$  мм. Ширина зазора между цилиндрами равнялась  $h = 75^{\pm 5}$  мкм. Внутренняя поверхность неподвижного цилиндра и наружная поверхность вращающегося цилиндра полировались. При этом среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости задавалось на уровне  $Ra = 0,8$ . Биения вращающегося цилиндра не превышали 0,01 мм. Размеры выбирались из условия, чтобы во всем диапазоне угловых скоростей

вращения внутреннего цилиндра соблюдался ламинарный режим течения. Для указанных размеров при максимальной скорости вращения внутреннего цилиндра 40000 об/мин максимальное значение числа Тейлора составляет  $Ta_{\max} = 31,3$ , что меньше критического значения  $Ta_{кр} = 41,3$ , а максимальное значение числа Рейнольдса – 626, что намного меньше критического числа Рейнольдса  $Re_{кр} = 3960$  перехода ламинарного течения в турбулентное [3]. Давление измерялось микроманометром ММН-2400 (5)-1,0. В процессе измерений скорость вращения внутреннего цилиндра варьировалась в диапазоне 100–33000 об/мин. Частота вращения 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.

Замеры проводились в следующей последовательности. С помощью электронной системы управления устанавливались определенные обороты электродвигателя, которые замерялись цифровым стробоскопическим тахометром. После чего с помощью микроманометра измерялись давления в точках А, В, С, расположенных на одной высоте. По измеренным значениям давления, вращая юстировочные винты 4, добивались совпадения его в трех точках. Это давление и фиксировалось вместе с оборотами цилиндра.

Результаты измерений представлены на рис. 2. Как видно из представленных данных, избыточное давление в щелевом зазоре вопреки предсказаниям теории Навье–Стокса не равно нулю, а растет с увеличением угловой скорости вращения внутреннего цилиндра по квадратичному закону. Результат находится в хорошем согласии с выводами теории, учитывающей волновой механизм распространения упругих взаимодействий. Следует отметить высокую степень достоверности аппроксимации полученных экспериментальных данных. Обращает на себя внимание также наличие в уравнениях аппроксимирующих кривых членов первого порядка, что может быть объяснено наличием незначительного эксцентриситета соосности цилиндров из-за зазора в подшипниках электродвигателя. В этом случае в зависимости давления от угловой скорости присутствуют члены первой степени от  $\Omega_1$ .

Следует указать также на отсутствие симметрии в расположении экспериментальных точек при  $z = 0,25$  и  $z = 0,75$  относительно середины высоты цилиндра, что связано с особенностями конструкции установки. В верхней части щелевой зазор контактирует с окружающим воздухом. Нижняя часть щелевого зазора находится внутри корпуса, где температура из-за тепловыделения электродвигателя в процессе эксперимента повышается. Поэтому температура окружающего воздуха при  $z = 0$  и  $z = 1$  не совпадает. При этом плотность в щелевом канале становится уже не постоянной, а изменяется по высоте цилиндра, убывая от верхней точки к нижней.

На рис. 3 приведено сравнение экспериментальных и теоретических кривых, рассчитанных по формуле (3) при  $k = 1,12 \cdot 10^{-7}$ . Как видно из графиков при  $z = 0,5$  совпадение теоретической и экспериментальной кривой, учитывая одномерность теории и приближенный характер описания тепловой задачи, достаточно хорошее. Совпадение же теоретических кривых при  $z = 0,25$  и  $z = 0,75$  с экспериментальными данными в силу указанных выше причин и влияния краевых эффектов значительно хуже.

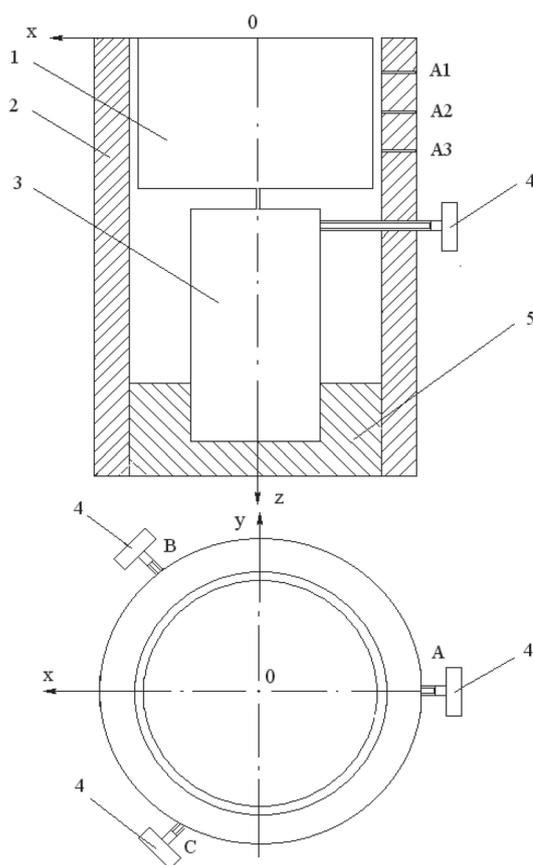


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – вращающийся цилиндр; 2 – неподвижный цилиндр; 3 – электродвигатель; 4 – регулировочные винты; А, В, С – места расположения дренажных отверстий для замера давления в зазоре между цилиндрами; А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub>, А<sub>3</sub> – дренажные отверстия в корпусе установки

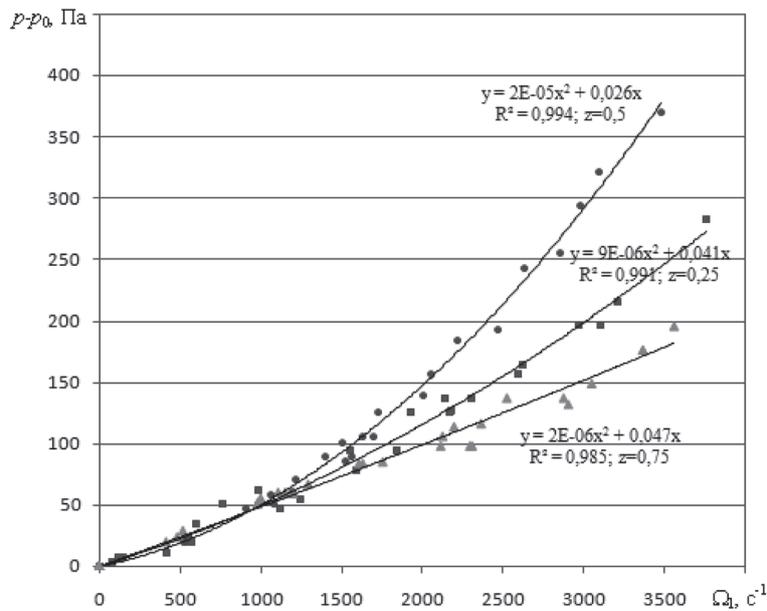


Рис. 2. Измеренные значения избыточного давления в зазоре между цилиндрами в зависимости от угловой скорости вращения внутреннего цилиндра

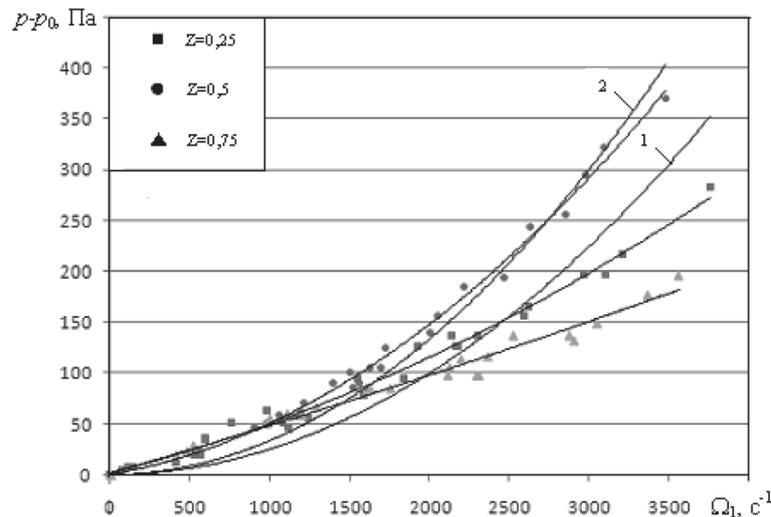


Рис. 3. Сравнение теоретических зависимостей, рассчитанных по формуле (3), с экспериментальными данными ( $k = 1,12 \cdot 10^{-7}$ ): 1 – теоретические кривые  $z = 0,25$  и  $z = 0,75$ ; 2 –  $z = 0,5$

**Заключение.** Проведенное экспериментальное исследование подтверждает, что полученные на основе теоретической модели локально-неравновесного течения зависимости не только качественно, но и количественно совпадают с экспериментом. Это указывает на то, что концептуально теория течения вязкой сжимаемой среды должна строиться с учетом волнового принципа распространения малых возмущений, согласно которому единственным источником формирования полей гидродинамических параметров в отсутствие массовых сил являются звуковые волны. Следует заметить, что однозначный вывод о форме представления уравнений, описывающих движение вязкой среды, касается только уравнения импульсов. Так как в ходе теоретического обоснования эксперимента обе модели включали одно и то же упрощенное уравнение энергии, то вопрос о его структуре остается открытым. Основываясь на анализе развития тепловых и механических процессов в потоках вязкой среды можно полагать, что уравнение энергии должно сохранять свою традиционную форму и преобразовываться к другому виду с заменой искомых функций на основе уравнения состояния. Хотя окончательный вывод остается за экспериментом.

## Литература

1. Тютюма В. Д. // Инженерно-физический журн. 2012. Т. 85, № 2. С. 333–335.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М., 1986. – 736 с.
3. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. М., 1963. Ч. 2. – 727 с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., 1974. – 712 с.
5. Тютюма В. Д. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2010. № 1. С. 77–81.
6. Тютюма В. Д. // Докл. НАН Беларусі. 2014. Т. 58, № 4. С. 106–109.

*V. D. TYUTYUMA*

tvd@hmti.ac.by

### **EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE MODEL OF LOCALLY NONEQUILIBRIUM VISCOUS FLUID FLOW**

#### **Summary**

Results of experimental verification of a new concept of the development of thermal and mechanical processes in viscous compressible flow medium are presented.