

УДК 621.1.016+532.526

В.Н. Ковальногов, Р.В. Федоров, Л.В. Хахалева, А.В. Чукалин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЛАМИНАРИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ В ПЕРФОРИРОВАННОЙ ТРУБЕ С ДЕМПФИРУЮЩИМИ ПОЛОСТЯМИ¹

Ковальногов Владислав Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи, монографии и изобретения в области моделирования, исследования и оптимизации тепловых и гидрогазодинамических процессов в энергоустановках и технологическом оборудовании. [e-mail: kvn@ulstu.ru].

Федоров Руслан Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика» УлГТУ. Имеет статьи и изобретения в области численного моделирования гидрогазодинамических процессов. [e-mail: r.fedorov@ulstu.ru].

Хахалева Лариса Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика» УлГТУ. Имеет статьи и изобретения в области численного моделирования гидрогазодинамических процессов. [e-mail: larvall@mail.ru].

Чукалин Андрей Валентинович, аспирант кафедры «Теплоэнергетика» УлГТУ. Имеет статьи в области численного моделирования гидрогазодинамических процессов. [e-mail: chukalin.andrej@mail.ru].

Аннотация

Экспериментально установлена возможность частичной ламинаризации турбулентного потока в перфорированной трубе с демпфирующими полостями, приводящей к уменьшению до 35% коэффициента сопротивления трения. Выявлено влияние количества перфорационных отверстий в демпфирующей полости на профиль скорости и сопротивление трения. Предложены модель турбулентного переноса в пограничном слое около перфорированной поверхности с демпфирующими полостями и метод расчета структуры потока и сопротивления трения. Ламинаризация течения, проявляющаяся в снижении интенсивности турбулентного переноса в пограничном слое, обусловленном внешними или внутренними воздействиями, играет важную роль в технике. По-видимому, впервые на возможность обратного перехода турбулентного течения в ламинарное (ламинаризации) под воздействием продольного отрицательного градиента давления указано в работе [1]. Дальнейшие исследования, обзор которых приведен в [2], показал, что ламинаризация в потоках с продольным отрицательным градиентом давления сопровождается существенным (до 35 ... 50%) снижением интенсивности теплоотдачи и одновременным возрастанием сопротивления трения. Предложенная в работе [2] модель ламинаризации в потоках с различными воздействиями позволила предсказать возможность ее реализации и около перфорированных поверхностей с демпфирующими полостями. При этом, в отличие от ламинаризации под воздействием продольного отрицательного градиента давления, здесь должно иметь место уменьшение как интенсивности теплоотдачи, так и сопротивления трения. Цель настоящей работы – экспериментальное исследование сопротивления трения в перфорированной трубе с демпфирующими полостями, имеющими разное число перфорационных отверстий, разработка модели процессов турбулентного переноса и метода расчета сопротивления трения.

Ключевые слова: перфорированная труба, демпфирующие полости, турбулентный перенос, математическое моделирование, сопротивление трения, пограничный слой.

MATHEMATICAL MODELING AND NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW LAMINARIZATION IN A PERFORATED TUBE WITH DAMPING CAVITIES

Vladislav Nikolaevich Kovalnogov, Doctor of Engineering, Head of the Department of Heat Power Engineering of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles, monographs, and inventions in the field of simulation, research, and optimization of thermal and hydro-gas-dynamic processes in power installations and processing equipment. e-mail: kvn@ulstu.ru.

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке грантом РФФИ по проекту № 15-48-02275-р_Поволжье_а.

Ruslan Vladimirovich Fedorov, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Heat Power Engineering of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles and inventions in the field of numerical modeling the hydro-gas-dynamic processes. e-mail: r.fedorov@ulstu.ru.

Larisa Valerievna Khakhaleva, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Heat Power Engineering of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles and inventions in the field of numerical modeling the hydro-gas-dynamic processes. e-mail: larvall@mail.ru.

Andrei Valentinovich Chukalin, Post-graduate Student at the Department of Heat Power Engineering of Ulyanovsk State Technical University; an author of articles and inventions in the field of numerical modeling the hydro-gas-dynamic processes. e-mail: chukalin.andrej@mail.ru.

Abstract

The authors have experimentally established the possibility of the partial turbulent flow laminarization in a perforated tube with damping cavities which leads to reduction of up to 35% of frictional resistance. The effect of the number of perforations in the damping cavity on the velocity profile and the frictional resistance has been revealed. The model of turbulent transfer in a boundary layer near the perforated surface with damping cavities and the method of calculating the flow pattern and frictional resistance were proposed. Flow laminarization manifested itself as the decrease of turbulent transfer intensity in the boundary layer due to external or internal influences plays an important role in engineering. Apparently, for the first time the possibility of a reverse transition of a turbulent flow in a laminarization one under the influence of a negative longitudinal pressure gradient was noted in the article [1]. Further researches overviewed in the paper [2] have demonstrated that laminarization in flows with negative longitudinal pressure gradient is accompanied by a substantial (up to 35 ... 50%) decrease of the intensity of heat and a simultaneous increase in the frictional resistance. The model of laminarization in the streams with different influences proposed in the paper [2] has allowed to predict the possibility of its implementation and a near perforated surface with damping cavities. As this takes place, in contrast to the laminarization under the influence of a negative longitudinal pressure gradient there must be a reduction of both the intensity of heat transfer and friction resistance. The purposes of this work are experimental investigation of frictional resistance in the perforated tube with damping cavities with a different number of perforations, the development of turbulent transfer process models and the calculation method of friction resistance.

Key words: perforated pipe, a damping cavity, turbulent transfer, mathematical modeling, friction resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Проанализируем механизм взаимодействия потока с демпфирующей полостью. Поток, движущийся со скоростью u , взаимодействует с полостью через перфорационные отверстия в обтекаемой поверхности (см. рис. 1). При этом турбулентные пульсации давления (и скорости) вблизи поверхности приводят к перетеканию некоторой массы газа m в полость и обратно. Из-за пружинящего эффекта полости (на рисунке 1 символом k обозначена упругость эквивалентной пружины) турбулентные пульсации ослабляются, что приводит к уменьшению сопротивления трения потока (а также интенсивности тепло- и массообмена) на обтекаемой поверхности.

Каждая полость может сообщаться с потоком посредством нескольких отверстий. Однако если расстояние между наиболее удаленными отверстиями меньше размера турбулентного образования, то механизм взаимодействия потока с полостью остается таким же, как и при одном отверстии. Если же расстояние между отверстиями существенно больше размера турбулентного образования, то с полостью будут взаимодействовать разные турбулентные образования, между пульсациями параметров в которых имеется фазовый сдвиг, что должно привести к снижению влияния демпфирующей полости на турбулентный перенос в пограничном слое. В работе [3] при изучении

сопротивления турбулентного потока в перфорированной трубе, содержащей демпфирующие полости, каждая из которых имела 5 отверстий диаметром 0,8 мм, наблюдалось снижение коэффициентов сопротивления трения на 10–13% по сравнению с течением в непроницаемой трубе. При этом расстояние между наиболее удаленными отверстиями в каждой демпфирующей полости (равное 10 мм) соотносилось с размером энергосодержащих вихрей (макромасштабом турбулентности) [4] как 8:1.

Целью настоящей работы являются экспериментальное исследование сопротивления трения в перфорированной трубе с демпфирующими полостями, имеющими разное число перфорационных отверстий n , разработка модели процессов турбулентного переноса и метода расчета сопротивления трения.

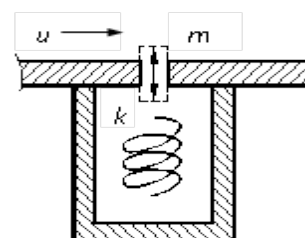


Рис. 1. Схема демпфирующей полости

В рассматриваемых условиях каждая демпфирующая полость могла взаимодействовать с одним энергосодержащим вихрем (при $n = 1$); с 2 разными вихрями при $n = 2$ и т. д. и, наконец, с 5 разными вихрями при $n = 5$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Осесимметричное движение турбулентного потока в трубе (как на начальном, так и на основном участке) можно описать дифференциальными уравнениями пограничного слоя и неразрывности:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \rho_{\infty} u_{\infty} \frac{du_{\infty}}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left[r(\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(\rho v r)}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

где u, v – продольная (вдоль осевой координаты x) и поперечная (вдоль координаты y) составляющие скорости потока соответственно;

r – радиус анализируемой точки;

ρ, μ – плотность и динамический коэффициент вязкости потока;

μ_T – коэффициент турбулентного переноса количества движения; индекс ∞ характеризует параметры на оси трубы.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} x = 0 : u &= u_0; \\ y = 0 : u &= 0; v = 0; \\ y = R : u &= u_{\infty}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь R – радиус проточной части трубы; индекс 0 характеризует параметры на входе в трубу.

Скорость u_{∞} в каждом сечении трубы определяется соотношением:

$$u_{\infty} = \frac{u_0 (\rho_0 / \rho_{\infty})}{1 - 2\delta^* / R}, \quad (4)$$

где толщина вытеснения δ^* выражается формулой:

$$\delta^* = \int_0^R \left(1 - \frac{y}{r} \right) \left(1 - \frac{\rho u}{\rho_{\infty} u_{\infty}} \right) dy. \quad (5)$$

При анализе изотермического течения можно принять $\rho_0 = \rho_{\infty} = \rho$.

Коэффициент турбулентного переноса количества движения μ_T в соответствии с моделью пути смешения Прандтля выразим зависимостью:

$$\mu_T = \rho l^2 \partial u / \partial y, \quad (6)$$

где длина пути смешения l может быть рассчитана по выражению:

$$l = \alpha y \{ 1 - \exp[-\rho v_* y / (26\mu)] \}. \quad (7)$$

Здесь v_* – динамическая скорость в рассматриваемой точке; α – коэффициент, характеризующий интенсивность турбулентного переноса количества движения.

В рамках классической модели пути смешения Прандт-

ля коэффициент α считается величиной постоянной ($\alpha = \alpha_0 = 0,4$). Однако в потоках с воздействиями, как показано в [2], этот коэффициент может претерпевать значительные изменения.

На значение коэффициента α в пограничном слое перфорированной трубы с демпфирующими полостями будет оказывать влияние ускорение потока на ее начальном участке, которое можно учесть поправкой, предложенной в работе [2], а также демпфирующие полости, способствующие дополнительному гашению турбулентных пульсаций. Воспользовавшись подходом [2], установим форму связи коэффициента α с влияющими параметрами при течении потока в перфорированной трубе с демпфирующими полостями.

Касательное напряжение трения τ_T , обусловленное турбулентными пульсациями скорости, можно определить соотношением:

$$\tau_T = -\rho \langle u'v' \rangle = \mu_T \partial u / \partial y, \quad (8)$$

где $\langle u'v' \rangle$ – усредненное во времени произведение мгновенных значений продольной u' и поперечной v' пульсаций скорости (корреляция).

Из (6)–(8) получаем:

$$\alpha / \alpha_0 = \sqrt{\langle u'v' \rangle / \langle u_0'v_0' \rangle} \approx \sqrt{\langle u' \rangle / \langle u_0' \rangle} \sqrt{\langle v' \rangle / \langle v_0' \rangle}. \quad (9)$$

Здесь $\langle u' \rangle, \langle v' \rangle$ – среднеквадратичные значения продольной и поперечной пульсаций скорости; индекс 0 характеризует параметры в условиях, принятых за эталонные (течение в непроницаемой трубе без демпфирующих полостей).

Проанализируем поведение турбулентного образования (моля) около перфорированной поверхности с демпфирующими полостями. Пусть объем этого моля равен V , и он сообщается с демпфирующей полостью (имеющей значительно больший объем) через перфорационное отверстие площадью f в стенке трубы.

Пусть турбулентный моль под влиянием случайных факторов получил избыточную продольную скорость $\Delta u = \langle u_0' \rangle$.

Пульсация скорости Δu в соответствии с уравнением Бернулли вызовет изменение Δp_1 давления p в объеме V :

$$\Delta p_1 = -\rho u \Delta u. \quad (10)$$

Это избыточное давление в непроницаемой трубе полностью пошло бы на генерацию турбулентной пульсации $\langle u_0' \rangle$. Однако на перфорированной поверхности с демпфирующими полостями в турбулентную пульсацию $\langle u' \rangle$ будет преобразована только часть p' этого избыточного давления:

$$p' = \Delta p_1 - \Delta p_2, \quad (11)$$

где Δp_2 – изменение давления за время Δt перемещения турбулентного моля на расстояние l , равное длине пути смешения.

Изменение Δp_2 давления p обусловлено перетеканием части среды из объема V в демпфирующую полость (или обратно) через перфорационное отверстие площадью f . Это изменение можно выразить зависимостью:

$$\Delta p_2 = \frac{\partial p}{\partial \tau} \Delta \tau \approx \frac{p}{\rho V} G \Delta \tau, \quad (12)$$

где G – средний за время $\Delta \tau$ массовый расход среды через перфорационное отверстие.

Расход G выразим зависимостью:

$$G = \varphi f \sqrt{2\rho \Delta p_1}, \quad (13)$$

где φ – коэффициент расхода.

С учетом (13) выражение (12) представим в виде:

$$\Delta p_2 \approx \frac{k p f \Delta \tau}{\rho V} \sqrt{\rho \Delta p_1}, \quad (14)$$

где k – числовой коэффициент.

Отношение f/V можно выразить следующей зависимостью:

$$f/V \approx \bar{f}/l, \quad (15)$$

где \bar{f} – относительная площадь перфораций (отношение площади перфорационных отверстий к площади поверхности проточной части трубы).

С учетом (15) имеем

$$\begin{aligned} \Delta p_2 &\approx \frac{k p f \Delta \tau}{\rho l} \sqrt{\rho \Delta p_1} = \frac{k p \bar{f}}{\rho v'} \sqrt{\rho \Delta p_1} = \\ &= k_1 p \bar{f} \sqrt{\frac{\langle u' \rangle}{u_0}} = k_2 p \bar{f}, \end{aligned} \quad (16)$$

где k_1, k_2 – числовые коэффициенты.

При записи выражения (16) использовано очевидное соотношение $v' = l/\Delta \tau = \varepsilon_v u_0'$, где ε_v – интенсивность поперечных пульсаций скорости; u_0 – масштабное значение скорости потока.

Среднеквадратичная пульсация скорости $\langle u' \rangle$ в рассматриваемых условиях с учетом (16) определится соотношением:

$$\langle u' \rangle = \frac{p'}{\rho u} = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\rho u} = \langle u_0' \rangle - \frac{k_2 p \bar{f}}{\rho u}. \quad (17)$$

Учитывая то, что для изотермического потока отношение p/ρ есть величина постоянная, пропорциональная квадрату масштаба скорости u_0^2 , проведем некоторые преобразования выражения (17):

$$\langle u' \rangle = \frac{p'}{\rho u} = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\rho u} = \langle u_0' \rangle - \frac{k_2 \bar{f} u_0^2}{u}. \quad (18)$$

Поперечная пульсация $\langle v' \rangle$ имеет одинаковый порядок с продольной пульсацией $\langle u' \rangle$ и может быть выражена соотношением, аналогичным (18):

$$\langle v' \rangle = \langle v_0' \rangle - \frac{k_3 \bar{f} u_0^2}{u}, \quad (19)$$

где k_3 – числовой коэффициент.

Заменив в выражениях (18), (19) местное значение скорости u на масштабное значение u_0 и подставив их в соотношение (9), после некоторых преобразований получим форму связи между коэффициентом α и влияющими факторами в виде:

$$\alpha/\alpha_0 = 1 - C \bar{f}^m, \quad (20)$$

где C и m – эмпирические коэффициенты.

Выражение вида (20) применимо в случаях, когда каждая демпфирующая полость сообщается с проточной частью посредством 1 отверстия или когда максимальное расстояние между отверстиями меньше размера энерго-содержащих вихрей. В иных случаях выражение должно учитывать несовпадение фаз пульсаций параметров в разных молях. Учитывая случайный характер турбулентных пульсаций это несовпадение можно учесть специальным сомножителем в правой части (20):

$$\alpha/\alpha_0 = 1 - C \bar{f}^m \exp[q(1-n)], \quad (21)$$

где q – эмпирический коэффициент.

С учетом поправки [2] на влияние продольного градиента давления выражение (21) примет вид:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{1 - C \bar{f}^m \exp[q(1-n)]}{1 + 21,4 \frac{u_\infty du_\infty/dx}{u_0 (\partial u/\partial y)_{y=0}}}. \quad (22)$$

В качестве масштабного значения скорости u_0 принята скорость на входе в экспериментальный участок.

Численное интегрирование системы уравнений (1)–(2), (4)–(7), (22) с граничными условиями (3) осуществляется методом прогонки (см., например, [2]) с использованием неявной 6-ти точечной разностной схемы. В результате интегрирования отыскивается распределение скорости в сечениях перфорированной трубы, местные и средние по длине трубы значения коэффициента гидравлического сопротивления ξ . Численные значения коэффициентов C, m, q определялись путем увязки экспериментальных данных по трению и профилям скорости с результатами расчетов. В итоге найдены следующие значения коэффициентов: $C = 1,242 \cdot 10^5$; $m = 2$; $q = 1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2 (демпфирующие полости на рисунке не показаны). Экспериментальный участок установки, общий вид которого приведен на рисунке 3, представляет собой прямую тонкостенную (толщина стенки 1,1 мм) цилиндрическую трубу внутренним диаметром 32 мм и длиной 1 м. В стенке трубы выполнены перфорационные отверстия диаметром 0,8 мм, с помощью которых движущийся в трубе поток взаимодействует с демпфирующими полостями. Общее число отверстий, расположенных по всей поверхности трубы в определенной закономерности, равно 1800.

Отверстия объединены в отдельные компактно расположенные группы. Каждая группа включает 5 отверстий. В каждой из этих групп центральное отверстие

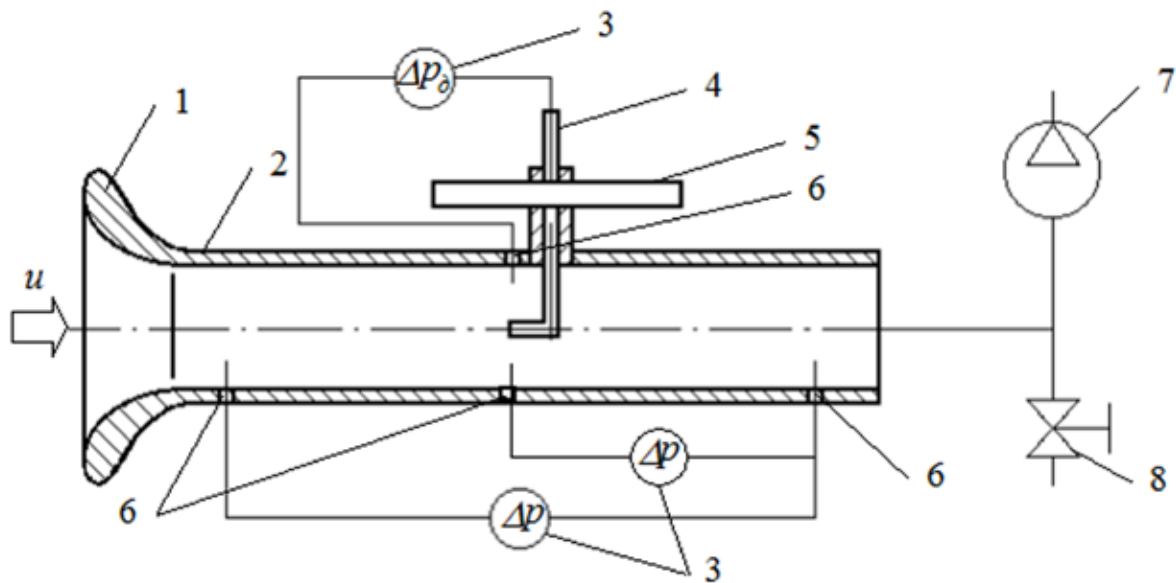


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – входное устройство; 2 – экспериментальный участок; 3 – микроманометр; 4 – приемник полного давления; 5 – координатное устройство; 6 – приемник статического давления; 7 – вентилятор; 8 – настроечный вентиль

располагается в центре окружности диаметром 10 мм, а 4 остальных – равномерно распределены по этой окружности. Демпфирующие полости образуются с помощью накладок, устанавливаемых на наружной поверхности трубы. На каждую группу из 5 отверстий приходится 1 демпфирующая полость, а общее их количество на рабочем участке равно 360. Диаметр полости – 12,8 мм, ее высота – 4,8 мм. За счет относительного перемещения трубы и накладки в окружном направлении обеспечивается изменение количества отверстий, соединяющих проточную часть с каждой полостью.

Коэффициент сопротивления трения ξ определялся в опытах по перепаду статического давления на участке трубы, расположенном в области стабилизированного течения, и среднерасходной скорости в сечении канала. Относительная погрешность опытного определения коэф-



Рис. 3. Экспериментальный участок

фициента ξ , приведенная к доверительной вероятности 0,95, лежит в пределах $\pm 4\%$.

Профиль скорости в сечении трубы измерялся с помощью микротрубки Пито (приемника полного давления), установленной в координатном устройстве.

Результаты экспериментального исследования сопротивления трения представлены на рисунках 4, 5. Здесь число Рейнольдса Re подсчитано по среднерасходной скорости потока и диаметру проточной части трубы; ξ_0 – коэффициент сопротивления трения на гладкой непроницаемой поверхности трубы. Приведенные на рисунке 5

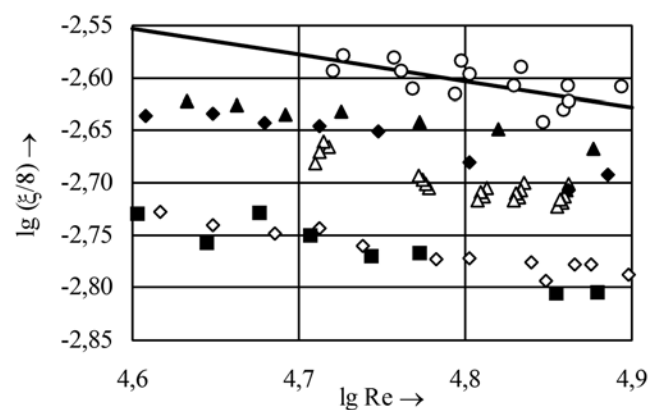


Рис. 4. Сопротивление трения потока в перфорированной трубе с демпфирующими полостями: \circ – тестовый эксперимент для гладкой поверхности без полостей; \triangle , \diamond , \blacksquare , \blacklozenge , \blacktriangle – эксперимент для перфорированной поверхности с полостями и соответственно с 1, 2, 3, 4, 5 отверстиями; линия – расчет по формуле Блазиуса $\xi = 0,3164/Re^{0,25}$

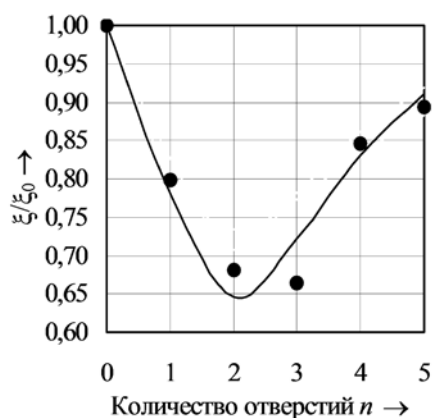


Рис 5. Влияние количества отверстий в демпфирующей полости на сопротивление трения: ● – эксперимент; линия – расчет по предлагаемой модели

результаты соответствуют усредненным в диапазоне чисел $Re = 40000-80000$ значениям относительного коэффициента сопротивления.

Как видно, при отсутствии демпфирующих полостей полученные результаты на основном участке течения потока в трубе удовлетворительно соответствуют расчету по формуле Блазиуса. Наличие демпфирующих полостей

приводит к существенному (до 35%) снижению коэффициентов сопротивления трения. При этом имеет место немонокотное изменение степени снижения коэффициента трения в зависимости от количества отверстий, сообщающихся с каждой демпфирующей полостью. Наибольший эффект имеет место при $n = 2-3$, что соответствует взаимодействию с каждой полостью 2-3 энергонесущих вихрей.

Профили скорости для различных условий проведения эксперимента, построенные в универсальных координатах $\varphi-\eta$, показаны на рисунке 6.

Можно отметить, что при отсутствии демпфирующих полостей полученные профили скорости в турбулентном ядре пограничного слоя удовлетворительно согласуются с универсальным профилем. При наличии демпфирующих полостей наблюдается систематическое отклонение экспериментально полученных профилей от универсального. Наибольшее отклонение имеет место при $n = 2-3$, при этом экспериментальные профили приобретают вид, характерный для случаев ламинаризации пограничного слоя под действием умеренных продольных отрицательных градиентов давления [2].

Результаты расчета и их сопоставление с опытными данными показано на рисунках 5, 6.

Как видно, предложенные модель и метод расчета удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным.

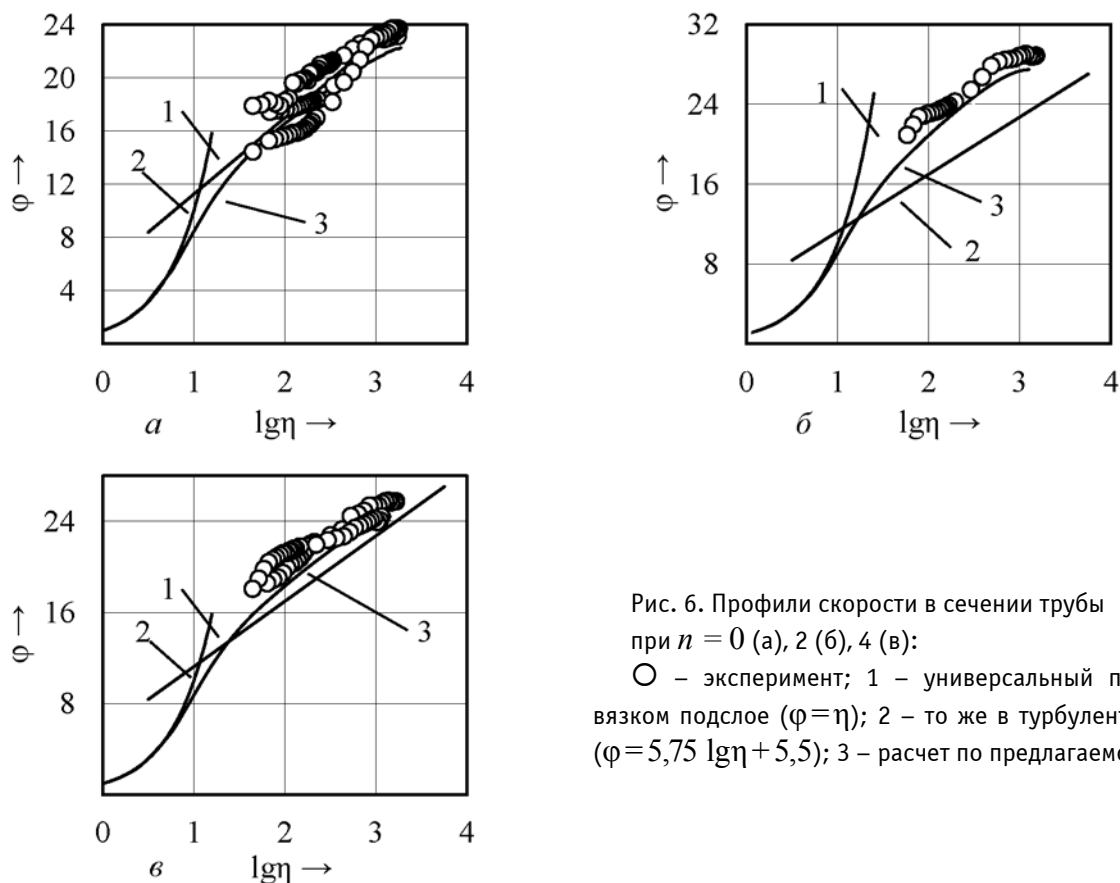


Рис. 6. Профили скорости в сечении трубы при $n = 0$ (а), 2 (б), 4 (в):

○ – эксперимент; 1 – универсальный профиль в вязком подслое ($\varphi = \eta$); 2 – то же в турбулентном ядре ($\varphi = 5,75 \lg \eta + 5,5$); 3 – расчет по предлагаемой модели

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Наличие демпфирующих полостей в перфорированной трубе приводит к существенному снижению коэффициентов сопротивления трения, обусловленному ламинаризацией пограничного слоя. Наибольшее снижение коэффициента трения (достигающее 35%) имеет место при 2–3 отверстиях, приходящихся на каждую демпфирующую полость. Разработанная модель турбулентного обмена и метод расчета позволяют адекватно учесть особенности обменных процессов около перфорированной поверхности с демпфирующими полостями и расчетным путем прогнозировать сопротивление трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейч М.Е., Лазарев Л.Я. Исследование перехода турбулентного пограничного слоя в ламинарный // Инженерно-физический журнал. – 1964. – Т. 7, № 4. – С. 18–24.
2. Ковальногов Н.Н. Пограничный слой в потоках с интенсивными воздействиями. – Ульяновск : УлГТУ, 1996. – 246 с.
3. Снижение сопротивления трения турбулентных газовых потоков в каналах и на поверхностях / Н.Н. Ковальногов [и др.] // Вестник УлГТУ. – 1998. – Вып. № 4. С. 109–113.
4. Дыбан Е.П., Эпик Э.Я. Теплообмен и гидродинамика турбулизированных потоков. – Киев : Наукова Думка, 1985. – 295 с.

REFERENCES

1. Deych M.E., Lazarev L.Ia. Issledovanie perekhoda turbulentnogo pograničnogo sloia v laminarnyi [Research of Transition of Turbulent Boundary Layer into a Laminar one]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Journal of Physics and Engineering], 1964, vol. 7, no. 4, pp. 18–24.
2. Kovalnogov N.N. *Pograničnyi sloi v potokakh s intensivnymi vozdeistviiami* [Boundary Layer in Flows with Intensive Interactions]. Ulyanovsk, UlSTU Publ., 1996. 246 p.
3. Kovalnogov N.N. et al. Snizhenie soprotivleniia treniia turbulentnykh gazovykh potokov v kanalakh i na poverkhnostiakh [Decreasing of Friction Resistance of Turbulent Gas Flows in Channels and on Surfaces]. *Vestnik UlGTU* [Bulletin of Ulyanovsk State Technical University], 1998, Iss. 4, pp. 109–113.
4. Dyban E.P., Epik E.Ya. *Teplomassoobmen i gidrogazodinamika turbulizirovannykh potokov* [Heat-Mass Exchange and Hydro-Gas-Dynamics of Turbulized Flows]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1985. 295 p.