

УДК 532:536.715

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО
ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ****Бутенко А.Г., Осипенко Е.В., Смык С.Ю.***Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина***АННОТАЦИЯ**

В статье рассмотрен вопрос определения гидравлического сопротивления при неизотермическом течении воздуха в напорном канале кольцевого сечения. Показано, что гидравлический коэффициент

трения кольцевого обогреваемого изнутри турбулентного потока вдоль канала возрастает, а увеличение температурного фактора при прочих равных условиях ведет к снижению сопротивления.

ВВЕДЕНИЕ

Определение гидравлического сопротивления при течении в напорных каналах является практически значимой и для изотермических условий хорошо изученной задачей. Влияние неизотермического характера течения, т.е. переменности физических свойств жидкости, рассматривались, как пра-

вило, с точки зрения теплообмена и в меньшей степени с позиции гидродинамики [1, 2, 3]. Развитие численных методов, в частности универсальных пакетов прикладных программ, позволяет достаточно легко моделировать процесс, получая при этом вполне достоверные результаты.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объект исследования – неизотермический турбулентный поток воздуха в напорном канале кольцевого сечения. Основной особенностью неизотермического течения является продольная и поперечная неравномерности распределения гидродинамически значимых свойств. В общем случае они зависят как от температуры, так и от давления. Степень влияния этих параметров на свойства газов разная. Так, если течение происходит со скоростью значительно меньшей скорости звука, то сжимаемостью можно пренебречь и считать, что плотность ρ зависит только от температуры. Другие физические свойства – динамическая вязкость μ , удельная изобарная теплоемкость c_p , коэффициент теплопроводности χ от давления практически не зависят. Характер их зависимости от температуры определяется атомностью газа. Для воздуха характерно возрастание значений μ , c_p и χ при росте температуры. Причем особенно сильный рост наблюдается у вязкости. Эта зависимость для газов с достаточной точностью описывается уравнением Сатерленда.

Если характер зависимости свойств от температуры выразить с помощью приближенных степенных соотношений [3]

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_\mu}, \quad \frac{\chi}{\chi_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_\chi}, \quad \frac{c_p}{c_{p0}} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_c}, \quad (1)$$

то для гидравлического коэффициента трения при неизотермическом течении с граничными условиями первого рода

$$\lambda = f_1(x/d; Re; Pr; \theta_c; n_\mu; n_\chi; n_c),$$

а в случае граничных условий второго рода

$$\lambda = f_2(x/d; Re; Pr; Q_c; n_\mu; n_\chi; n_c),$$

где $\theta_c = T_c/T_{mac}$ – безразмерная температура или температурный фактор (T_c – температура стенки, T_{mac} – среднemasовая температура газа);

$Q_c = q_c d / (\chi_{mac} T_{mac})$ – безразмерная плотность теплового потока (q_c – плотность теплового потока у стенки);

x/d – относительное удаление рассматриваемого сечения от входа в трубу (принимается к рассмотрению для сечений, где на гидродинамику потока оказывают влияние условия входа).

Учитывая, что с изменением температуры число Прандтля изменяется не существенно, а показатели степени в (1) для заданного газа – воздуха неизменны, то в случае течения вдали от входа в трубу процесс следует моделировать по Re и θ_c или Q_c .

Моделирование, задачей которого являлось определение зависимости коэффициента гидравлического трения λ от температурного фактора и однозначно связанной с ним степени равномерности распределения вязкости $n = \mu_{mac}/\mu_c$, проводилось с помощью прикладного пакета Solid Works. Рас-

сматривалась труба кольцевого поперечного сечения с диаметрами внутренней поверхности $D_1 = 109$ мм и наружной поверхности $D_2 = 202$ мм. Эквивалентная шероховатость стенок принималась равной 0,15 мм, что соответствует оцинкованному железу [4]. Поля температур и скоростей на входе однородные.

Задавались граничные условия первого рода – температуры наружной (теплоизолированной) стенки t_H и газа на входе t_0 принималась равной 20

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам расчетов строились графики изменения вдоль канала средней скорости, статического давления, касательных напряжений на стенках τ_1 и τ_2 , среднemasовых термодинамической температуры, плотности ρ_{mac} и динамической вязкости μ_{mac} . В качестве примера на рис.1 и 2 представлены поля относительной температуры и скорости для условий $t_c = 500$ °С, $v_0 = 12$ м/с.

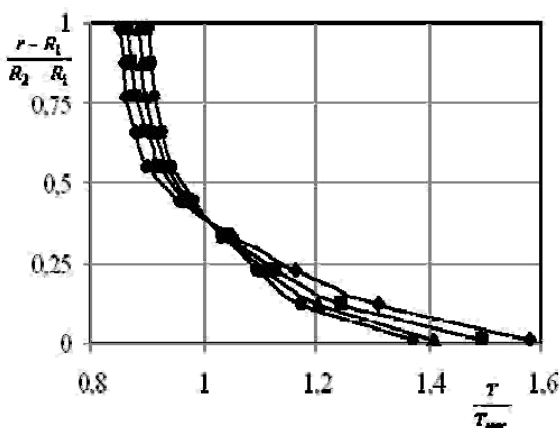


Рис.1. Изменение поля температур вдоль канала: \blacklozenge – $x/N = 86$; \blacksquare – $x/N = 172$; \blacktriangle – $x/N = 258$; \bullet – $x/N = 344$

Гидравлический коэффициент трения рассчитывался двумя способами: по перепаду давления на некотором участке и по значениям касательных напряжений на противоположных стенках сечения.

В первом случае использовалось соотношение [3]

$$\Delta P_i = \int_{x_i-\Delta x}^{x_i+\Delta x} \lambda_i \frac{(\rho_i v_i)^2}{2\rho_{mac}} \frac{dx}{d_{эвк}} + (\rho_i v_i)^2 \left[\left(\frac{\beta}{\rho_{mac}} \right)_{x_i+\Delta x} - \left(\frac{\beta}{\rho_{mac}} \right)_{x_i-\Delta x} \right], \quad (2)$$

где ΔP_i – перепад давления в окрестностях сечения с удалением от входа x_i на участке длиной $2\Delta x$;

°С, а внутренней стенки $t_c = 500$ °С и 1000 °С = const. Таким образом, рассматривалось течение воздуха в канале разогреваемом изнутри. Средне-расходные скорости во входном сечении v_0 задавались равными 5, 10, 11, 12, 13, 14 и 15 м/с. Из-за нагревания воздуха и его температурного расширения скорость вдоль канала возрастала; возрастала также и вязкость, а следовательно течение происходило с переменным числом Рейнольдса.

$\rho_i v_i$ – средняя массовая скорость в рассматриваемом сечении;

$d_{эвк}$ – эквивалентный диаметр кольцевого канала;

β – коэффициент Буссинеска (в расчете принимался равным 1,03);

Первое слагаемое правой части (2) характеризует составляющую в общем перепаде давления, вы-

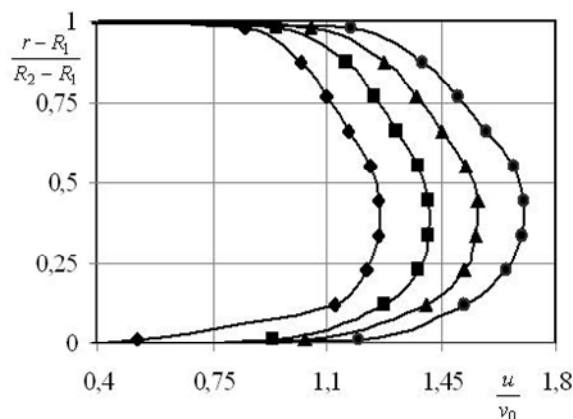


Рис.2. Изменение поля скоростей вдоль канала. \blacklozenge – $x/N = 86$; \blacksquare – $x/N = 172$; \blacktriangle – $x/N = 258$; \bullet – $x/N = 34$

званную гидравлическим трением. Второе – термическим ускорением потока, вызванное изменением плотности.

Во втором случае

$$\lambda = \frac{8d_{эвк}(D_1\tau_1 + D_2\tau_2)}{(D_2^2 - D_1^2)\rho_{mac}v_{mac}^2}, \quad (3)$$

Расчет гидравлического коэффициента трения по (2) и по (3) дал совпадающие результаты. Расчеты показали, что в условиях снижающихся вдоль канала числа Рейнольдса и температурного фактора, а так же возрастающей степени равномерности распределения вязкости $n = \mu_{mac}/\mu_c$ коэффициент Дарси возрастает (рис.3).

Поскольку изменение λ вдоль канала вызвано совокупным действием двух факторов – изменением Re и θ_c , т.е. μ_{mac}/μ_c , то целесообразно предста-

вить результаты расчетов в таком виде, в котором один из факторов выступал бы в качестве параметра. На рис.4 представлены графики $\lambda = f(\text{Re})$, ($\text{Re} = \frac{v_i \rho_{\text{мас}} H}{\mu_{\text{мас}}}$, $H = 0,5(D_2 - D_1)$) построенные для разных значений $\mu_{\text{мас}}/\mu_c$.

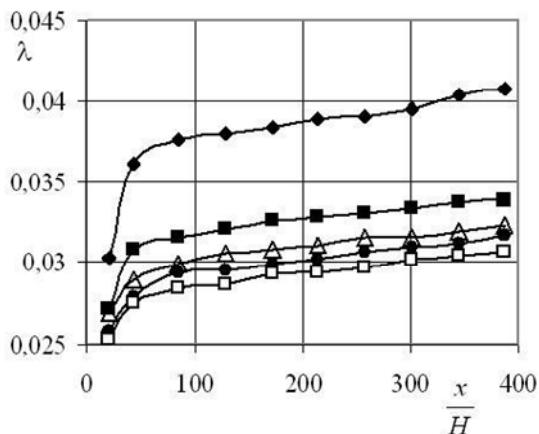


Рис.3 Изменение поля скоростей вдоль канала. \blacklozenge – $V_0 = 5$ м/с; \blacksquare – $V_0 = 10$ м/с; \triangle – $V_0 = 12$ м/с; \bullet – $V_0 = 13$ м/с; \square – $V_0 = 15$ м/с

Как видно, моделируемое течение происходило в области гидравлически гладких труб. Увеличение степени неравномерности распределения вязкости

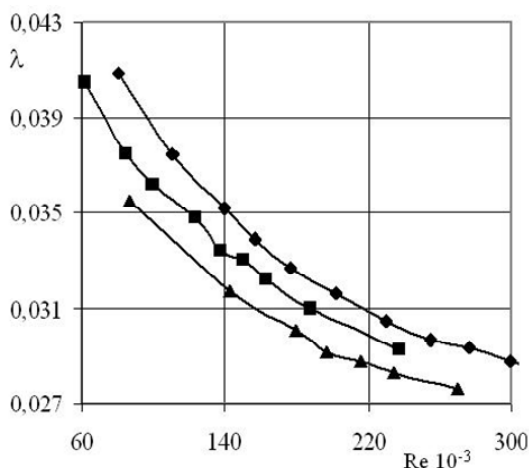


Рис. 4 Зависимость λ от Re . \blacklozenge – $\mu_{\text{мас}}/\mu_c = 1$ (изотермическое течение); \blacksquare – $\mu_{\text{мас}}/\mu_c = 0.65$; \blacktriangle – $\mu_{\text{мас}}/\mu_c = 0.45$

($1/n$) приводит к снижению гидравлического сопротивления. Аналогичные результаты получены в [5, 6, 7] для течения воздуха в обогреваемой круглой трубе. Объяснение этому следует искать в характе-

ристиках потока в вязком пристенном слое, поскольку именно здесь преобладающую роль играет физическая вязкость и, как известно, проходит большая доля диссипативных процессов.

Наиболее очевидной причиной увеличения гидравлического сопротивления вдоль канала является то, что возрастает вязкость вблизи внешней стенки кольцевого канала, а вязкость у внутренней остается неизменной, т.к. неизменной является ее температура. Кроме того, как показали расчеты, вдоль канала касательные напряжения увеличиваются как у внешней так и у внутренней стенки, вязкость на которой постоянна. Таким образом, увеличение гидравлического коэффициента трения вдоль канала является следствием не только изменения физической вязкости. Дополнительным фактором является изменение градиента скорости на стенках, вызванного тепловым расширением и соответствующего увеличению скорости течения (на рис.5 представлены их значения приведенные к соответ-

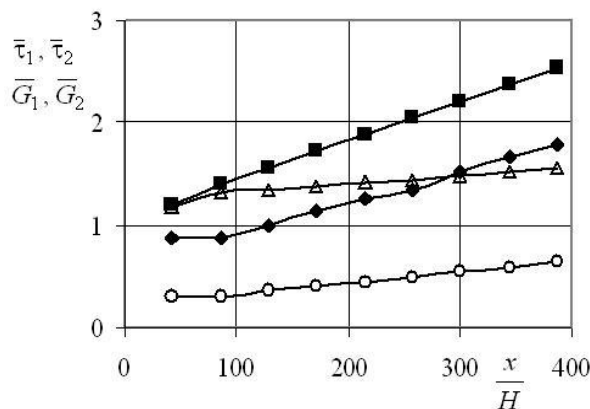


Рис.5 Изменение относительных касательных напряжений и градиентов скорости вдоль канала. \blacksquare – $\bar{\tau}_2$; \blacklozenge – $\bar{\tau}_1$; \triangle – \bar{G}_2 ; \circ – \bar{G}_1

вующим значениям изотермического потока).

Расчеты показали, что с увеличением температурного фактора и соответственной ему неравномерности распределения вязкости, форма эпюры массовой скорости претерпевает изменение. Она становится более неравномерной, а ее максимум приближается к внешней стенке, т.е. происходит перераспределение движущей массы в область с пониженной вязкостью. По-видимому, именно это является причиной того, что при прочих равных условиях коэффициент Дарси ниже для течений с более высокой степенью неравномерности распределения вязкости. Сравнивая полученный результат с данными, для течения воздуха в круглой трубе [7], можно отметить, что в кольцевых каналах тепловая деформация поля скоростей более выражена, хотя в обоих случаях эпюра массовой скорости оказалась менее заполненной у обогреваемой стенки.

ВЫВОДЫ

Моделирование показало, что за счет изменения вязкости и градиента скорости у стенок кольцевого канала течение происходит с переменным гидравлическим сопротивлением. Как и в случае труб

круглого поперечного сечения, увеличение степени неравномерности распределения вязкости при прочих равных условиях ведет к снижению гидравлического коэффициента трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петухов Б.С., Ройзен Л.И. Обобщенные зависимости для теплоотдачи в трубах кольцевого сечения – Теплофизика высоких температур// 1974. – т. 12, № 3. – С. 565 – 569.
2. Бобков В.П., Ибрагимов М.Х., Саванин Н.К. Теплообмен при турбулентном течении различных теплоносителей в кольцевых зазорах//Теплофизика высоких температур, 1975. – т. 13, № 4. – С. 779 – 786.
3. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учеб. пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 472 с.
4. Справочник по гидравлике / Под ред. В.А. Большакова. – К.: “Вища школа”, 1984. – 344 с.
5. Лельчук В.Л., Дядякин Б.В. Экспериментальное определение гидравлического сопротивле-
6. Максин П.Л., Петухов Б.С., Поляков А.Ф. Расчет турбулентного переноса импульса и тепла в трубах газа с переменными физическими свойствами//Теплофизика высоких температур. – 1977, т. 15, № 5. – С. 1019 – 1026.
7. Петухов Б.С., Попов В.Н. Теоретический расчет теплообмена и сопротивления трения при течении в трубах несжимаемой жидкости с переменными физическими свойствами// Теплофизика высоких температур, 1963. – т. 1, № 1. – С. 85 – 90.