

Для исследования характеристик нестационарных турбулентных потоков существует возможность применения различного экспериментального диагностического оборудования [1, 2]. Однако использование подобных средств диагностики не всегда оправдано, а иногда затруднительно. Альтернативой экспериментальным методам исследования является математическое моделирование, которое, применительно к рассматриваемой задаче может быть проведено, в частности, на основе интегральных соотношений неразрывности потока, импульсов и энергии в приближениях теории пограничного слоя. Эти соотношения получаются из уравнений (1), (2), (3): $\rho \frac{dV}{dt} = \dots$ (1) (2) (3) где V в результате умножения их на r и почленного интегрирования по радиусу канала: (4) (5) (6) где τ Выражение для локальных коэффициентов трения и теплоотдачи в виде $\tau = \dots$ (7) , (8) а также для профилей скорости и плотности по толщине турбулентного пограничного слоя (9) (10) Получены на основе использования гипотез Л.Прандтля и Ж.Фурье, в виде известных соотношений $\tau = \dots$ (11) для турбулентных касательных напряжений, и для плотности тепловых потоков $q = \dots$ (12) Для аппроксимации распределений касательных напряжений и тепловых потоков, входящих в (7), (8), (9) и (10) использованы полиномы $\tau = \dots$ (13) , $q = \dots$ (14) взятые из работ [2], [3]. Нахождение параметров τ и q не представляет сложности. Для этого уравнение (2) исходя из условия прилипания жидкости к стенке, представляется в виде (15) а из него получается (16): $\tau = \dots$ (16) Для потенциального ядра потока, выражение для продольного градиента давления имеет вид: (17) Окончательно имеем: $\tau = \dots$ (18) Аналогичным способом и с учетом условий на стенке $\tau = \dots$, $q = \dots$, из уравнения (3) получается выражение для производной $\frac{dV}{dr} = \dots$ (19) Выражения для параметров на внешней границе вязкого подслоя (20) и $\tau = \dots$ (21) входящие в (7) и (8), получены интегрированием (2) в пределах вязкого подслоя с использованием линейного закона «стенки»: $\tau = \dots$ (22) Для установления связи между плотностью рабочего тела и параметрами состояния P и T воспользуемся уравнением Клапейрона-Менделеева $P = \dots$ (23) считая, что рабочее тело представляет собой совершенный газ, а турбулентное число Прандтля независимо от фактора гидродинамической нестационарности и равно 0,9. Решение системы (4) - (6), для области гидродинамического начального участка проведено, конечноразностным методом. Расчетная сетка показана на рис.1. Рис. 1 - Расчетная сетка Уравнения (4), (5), (6) заменялись, конечноразностными аналогами в явном виде с первым порядком аппроксимации. Граничные и начальные условия на каждом шаге аппроксимации задавались в виде: $\tau = \dots$, $q = \dots$, $V = \dots$ (24) , $\rho = \dots$ (25) Условия (24) задавались при постановке задачи, а начальные условия в первом приближении принимались в виде $\tau = \dots$, $q = \dots$ (26) Расчет начинался с точки (1;1). По известным значениям параметров τ , q , V , ρ и r , производился расчет по формулам (7)-(21) итерационными методами до выполнения условий: $\tau = \dots$, $q = \dots$, где n - номер итерации. В каждой расчетной точке определялись τ , q , V , ρ , r . Начальные условия задавались приближенно, поэтому применялся нестационарный метод расчета.

Расчет производился до тех пор, пока не выполнится условие для каждой точки :

(27) Таблица 1 - Условия расчетов

Номер режима	1	2	3	Тип канала
цилиндр				
диффузор				
Конфузор				
Угол раскрытия, $\text{tg}\alpha$	0	0,021875	-0,021875	
Длина предвключенного участка, м	0	0,225	0,225	
Диаметр предвключенного цилиндра, м	0,05	0,05	0,075	
Период, сек	0,55	0,5	0,5	
[м/с]	47,5	60	50	0,47368 0,66666 0,6
Сетка, 27x47 51x51 51x51				

Ниже в качестве примера приведены результаты расчета некоторых гидродинамических параметров нестационарного турбулентного течения воздуха в цилиндрических, конфузорных и диффузорных каналах. Во всех расчетах распределение скоростей во входных сечениях каналов (при $x=0$) принималось равномерным, а изменение расхода рабочей среды - происходящим по гоманическому закону следующего вида (28): (28)

Наблюдаемая на графиках (рис. 2) картина свидетельствует о том, что при нестационарном, в частности, в пульсирующем течении рабочего тела в закрытом канале изменения различных параметров потоков в различных сечениях гидродинамических начальных участках происходят с существенными сдвигами по фазе. Причем характер этих сдвигов в значительной степени зависит от формы проточной части канала. Рис. 2 - Изменение фазовых сдвигов скоростей потока в потенциальном ядре по длине цилиндрического (1), диффузорного (2) и конфузорного (3) каналов Рис. 3 - Изменение осредненных за период пульсации потока значений пристенных касательных напряжений по длине гидродинамического начального участка в цилиндрическом (1), диффузорном (2) и конфузорных (3) каналах Рис. 4 - Фазовые сдвиги в колебаниях пристенных касательных напряжении по длине гидродинамического начального участка в цилиндрическом (1), диффузорном (2) и конфузорных (3) каналов На рис. 5 представлены пространственно-временные развертки значений локальных коэффициентов трения (а), толщины вытеснения (б), и толщины потери импульса (в) в области гидродинамических начальных участков диффузорного канала. а б в Рис. 5 - Пространственно-временные развертки значений локальных коэффициентов трения (а), толщины вытеснения (б), и толщины потери импульса (в) в области гидродинамических начальных участков диффузорного канала

Условные обозначения x, r - оси цилиндрической системы координат, [м]; u, v, w - проекции осредненных значений скоростей на соответствующие оси, [м/с]; T - температура, [°C]; ρ - плотность, [кг/м³]; τ - касательное напряжение, [н/м²]; q - плотность тепловых потоков, [Вт/м²] R - универсальная газовая постоянная; A - амплитуда; W - циклическая частота, [1/сек]; Индексы: 1 - вход в канал или внешняя граница вязкого подслоя; W - на стенке; 0 - на оси.