

УДК 697.9

Обзор и анализ аэро- и термодинамических процессов в проеме с воздушно-тепловой завесой

Д-р техн. наук Григорьев А.Ю. augrig@bk.ru
Жигновская Д.В. diana.zhignovskaya@gmail.com
Университет ИТМО
191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В статье сделан обзор и анализ изученных аэро- и термодинамических процессов, происходящих в проеме с воздушно-тепловой завесой, которые являются важным и защитным оборудованием для чистых комнат, пищевых цехов, и холодильных складов и камер. Представлены методы расчёта траектории оси струи в безграничном сносящем потоке. Данные исследований представляют немалый интерес при проектировании и конструировании воздушно-тепловых завес и разработке различных вариантов математического моделирования газодинамических процессов, происходящих в проеме с воздушными завесами.

Ключевые слова: воздушные завесы, распространение струи в сносящем потоке, траектория струи, движение воздуха, параметры струи, турбулентное и ламинарное течение, динамическое давление в потоке и струе.

DOI:10.17586/2310-1148-2016-9-4-6-15

The review and the analysis aero - and thermodynamic processes in an aperture with an air and thermal veil

D.Sc. Grigoriev A.Yu. augrig@bk.ru
Zhignovskaya D.V. diana.zhignovskaya@gmail.com
ITMO University
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

In article the review and the analysis studied aero- and thermodynamic processes, happening in an aperture to an air and thermal veil which are the important and protective equipment for clean rooms, food shops, and refrigerating warehouses and cameras is made. Stream axis trajectory computational methods in the boundless taking-down stream are presented. Data of researches are of considerable interest at projection and construction of air and thermal veils and development of various options of mathematical model operation of the gasdynamic processes happening in an aperture to air curtains.

Keywords: air curtains, distribution of a stream in the taking-down stream, a stream trajectory, driving of air, stream parameters, a sinuous and laminar flow, impact pressure in a stream and a stream.

Воздушно-тепловые завесы помогают решить сразу несколько проблем, связанных с поддержанием микроклимата в помещениях, разделения воздушных зон в технологическом кондиционировании и защиты воздушной среды.

ВТЗ может защитить проем, где она установлена от (рис. 1):

– пыли и грязи что, безусловно, важно в чистых помещениях технологических цехов пищевого производства, фармацевтики или производства микроэлектроники, а также в некоторых отраслях промышленности связанных с выделением большого количества пыли от объекта производства;

– от потерь тепла зимой или холода летом через открытый проем здания или иного объекта, что естественно, отражается на энергоэффективности СКВ объекта в целом, так как открытые проемы приводят к значительным потерям тепла или холода и являются основной причиной образования сквозняков в помещении;

– от насекомых, что в некоторых климатических районах является важным.

Но по большей части воздушно-тепловые завесы используются для разделения зон с различной температурой воздушной среды по разные стороны открытых проемов разгрузочных окон, входных дверей и ворот.

Воздушные, воздушно-тепловые или воздушные охлаждаемые завесы могут быть шиберного, смешивающего и комбинированного типа.



Рис. 1. Воздушно-тепловая завеса

Завесы шиберного типа в результате частичного перекрытия проема потоком воздуха значительно сокращают прорывы наружного воздуха через открытый проем, а в помещение поступает образовавшаяся смесь наружного воздуха и воздуха завесы. Часто применяются двусторонние шиберные завесы, которые komponуются из двух отдельных агрегатов смонтированных по разные стороны проема.

Завесы смешивающего типа осуществляют эффективное смешивание наружного воздуха с воздухом нагретым завесой. Такие завесы обычно устанавливают в тамбурах на входе в объект. Завесы комбинированного типа сочетают в себе оба способа защиты проема. Двухпоточные завесы (рис. 2) имеют два разделенных потока: первый высокоскоростной поток без нагрева, осуществляющий первичную барьерную функцию, и основной нагретый поток подогревающий.

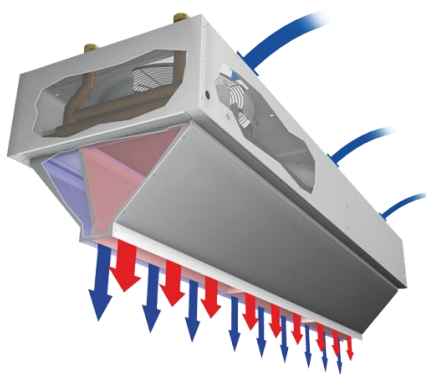


Рис. 2. Двухпоточная промышленная завеса

В России впервые воздушные завесы начали применять в конце 20-х годов 20-ого века. Наибольшее применение воздушно – тепловые завесы нашли в борьбе с холодным воздухом, который проникает через проемы дверей, ворот и разгрузочных окон в холодный период года. Соответственно большинство теоретических и экспериментальных научных работ было посвящено изучению данного варианта применения завес.

Развитие струи воздушно – тепловой завесы происходит в поперечном потоке воздуха. На данный момент есть несколько теорий для свободной турбулентности – это теория Прандтля, новая теория Прандтля, теория Тейлора, теория Маттиоли и ряда других авторов. Профессор Г.Н. Абрамович [5] взял за основу существующие теории о свободной турбулентности, и с их помощью разработал свою теорию свободных струй.

В тоже время Е.И. Поляков сделал предположение о том, что начальная турбулентность на характер распространения свободной струи не влияет, и выявил, что в основном участке наблюдается один и тот же угол расширения струи.. Данное положение было учтено в обновленной теории свободных турбулентных струй Г.Н. Абрамовича [7] и в работах В.Н. Талиева.

Многие задачи вентиляции (высокоскоростное воздуораспределение, аэрация, воздушное отопление, и др.) связано с развитием неизотермических струй. В.В. Батурич и И.А. Шепелев [15] сделали первую попытку определить траекторию неизотермической струи. В их работе указано, что критерий Архимеда влияет на искривление неизотермических струй.

В 1965 г. С.Е. Бутаков и В.Д. Столер [19] провели специальный эксперимент для того чтобы проверить принимаемое многими авторами допущение о том, что количество движения постоянно в поперечном сечении турбулентной струи. Данные полученные в ходе этих экспериментов выявили, что количество движения в струе, которая истекает из отверстия круглого сечения в сносящий поток, не изменяется, но при этом всегда составляет величину меньшую чем, если бы сносящий поток отсутствовал. И чем угол наклона струи больше к потоку, а так же больше скорость сносящего потока, тем меньше количество движения.

Ю.В. Иванов [20] в своей работе наиболее полно изучил распространение струй в сносящем потоке. В его работе рассмотрены траектории одиночной прямоугольной, плоской и круглой струй в ограниченном и свободном поперечном потоках. Чтобы создать плоскую струю использовались сопла с шириной 0,9; 2,7; 4,0 мм. Эксперименты проводились при двух значениях отношения абсолютных температур $T_2/T_1 = 1$ и 2. Изменения отношения кинетических энергий струи к сносящему потоку составляли от 400 до 12,5. Эксперименты проводились с соплами, установленными под углами: $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 30^\circ$. Развитие струи показано на рис. 3.

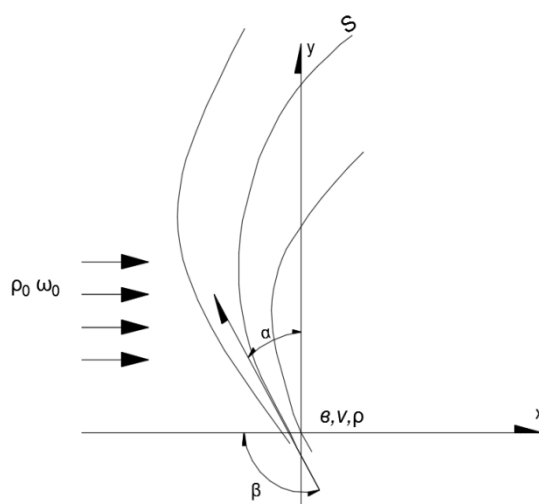


Рис. 3. Схема развития струи в поперечном потоке

После обработки экспериментальных данных Ю.В. Иванов [21] предложил уравнение для расчета плоской струи в сносящем потоке:

$$\frac{ax}{\epsilon_0} = 1.9 \left(\frac{\rho_0 \omega_0^2}{\rho v^2} \right) \left(\frac{ay}{\epsilon_0} \right) + \frac{ay}{\epsilon_0} \text{Ctg} \beta, \quad (1)$$

где y – расстояние от оси сопла по нормали к сносящему потоку; x – расстояние от оси сопла по направлению сносящего потока; ϵ_0 – полуширина сопла; v – скорость истечения газа; w_0 – скорость сносящего потока; ρ – плотность газа; ρ_0 – плотность сносящего потока; a – коэффициент структуры струи;

Линия, соединяющая точки с максимальными значениями скоростей принята Ю.В. Ивановым как ось струи.

И.Б. Палатник и Д.Ж. Темирбаев [22] подробно исследовали закономерности определяющие распространение осесимметричной струи воздуха в сносящем потоке. Их аналитическое решение определяет траекторию струи через составление баланса сил на отдельно взятом элементе струи. Вычисления траектории струи проводились численным методом, так как окончательное уравнение имеет сложный вид. Особенности такого вида струйного течения, закономерности поля сил, воздействующих на струю при изотермическом и при неизотермическом течении, а также эксперименты по изучению структуры течения в полной мере указано в работе [79]. Для $d = 20$ мм, $\alpha = 90^\circ$ получена следующая формула для траектории струи:

$$\frac{x}{d} = 1.1 \frac{\rho_0 \omega_0^2}{\rho v^2} \left(\frac{y}{d} \right)^{2.5}. \quad (2)$$

В. Newman в 1961 г. [23] сделал первые попытки теоретически обосновать это явление. В качестве основы расчета были взяты следующие положения: внутри циркуляционной зоны давление распределяется равномерно, осевая линия струи изгибается по дуге окружности радиусом R , ширина струи мала по сравнению с радиусом R , скорость распределяется в изогнутой струе аналогично свободной струе, количество движения в струе постоянно.

В результате исследования получилось уравнение, с помощью которого можно определить основные параметры струи, развивающейся вблизи плоской поверхности. Так, расстояние до точки деления потока на прямое и обратное течение вдоль плоской стенки, определяется по следующей зависимости:

$$x_1 = \frac{\sigma b_0 \left(\frac{1}{t^2} - 1 \right) \sin \Theta_1}{3\Theta_1} - \frac{\epsilon_0 t h^{-1} t}{3t^2 \sin \Theta_1}. \quad (3)$$

Угол наклона струи при встрече с плоской поверхностью:

$$\frac{Da}{b_0} = \frac{\sigma \left(\frac{1}{t^2} - 1 \right) (1 - \cos \Theta_1)}{3\Theta_1} - \frac{1}{2}, \quad (4)$$

$$\cos \Theta_1 = \frac{3}{2} + \frac{3}{4} t - \frac{1}{4} t^3, \quad (5)$$

Через некоторое время И.А. Шепелев [24] представил новый метод расчета воздушных завес, основанный на принципе наложения потоков. Для нахождения уравнения траектории оси по этому методу складывались функции сносящего потока и тока струи, при этом было принято допущение, что статическое давление в струе остается неизменным. И.А. Шепелевым были выведены формулы, при помощи которых можно определить количество воздуха, поступающего в помещение при работе завесы

В дальнейшем больше внимания было акцентировано на динамических методах решения.

М.С. Волынский предложил схему, которую в дальнейшем использовал Г.Н. Абрамович [8]. В этой схеме определение искривления струи строилось из условия уравнивания силы, которая

$$\frac{y}{d} = \sqrt{39aLn} \frac{10 + \frac{x}{d} + \sqrt{\left(\frac{x}{d}\right)^2 + 20\left(\frac{x}{d}\right) + 7aCtg^2\beta}}{10 + \sqrt{7a} * Ctg\beta}, \quad (6)$$

где:

$$a = \frac{\rho v^2}{c_n \rho_0 \omega_0^2} \sin \alpha_0. \quad (7)$$

c_n – коэффициент силы, зависящий от формы крыла.

Чтобы определить ось плоской струи в сносящем потоке им предложено следующие выражение:

$$y = \frac{2}{k} (\sqrt{kx + Ctg^2\beta} - Ctg\beta) \quad (8)$$

$$k = \frac{c_n \rho \omega^2}{\epsilon_0 \rho_0 u_0^2 \sin^2 \beta} \quad (9)$$

В ходе экспериментальных исследований Г.Н. Абрамовича, В.А. Голубевой, И.С. Макарова и Л.Е. Макарова [8] установлено, что перепад статического давления вокруг струи влияет на коэффициент сопротивления c_n при обтекании струи воздушным потоком.

Эксперимент показал, что одиночная плоская струя имеет меньшее отклонение, чем веерная при тех же условиях.

По аналогии с работой Г.Н. Абрамовича, Я.М. Визель и Й.Д. Мостинский [25] в своих теоретических изысканиях рассматривали струю, в качестве крыла, на которое действует сила набегающего потока. Они определили форму оси плоской струи, используя величину лобового сопротивления, которое струя оказывает потоку:

$$\frac{x}{\epsilon_0} = \frac{1}{4} C_x \rho_0 \omega_0^2 (\rho v^2 \sin \beta)^{-1} \left(\frac{y}{\epsilon_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{\epsilon_0}\right) Ct g \beta \quad (10)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления струи сносному потоку.

И.А. Шепелев [26] в работе сделал попытку определить форму оси струи независимо от формы выходного отверстия. Он вычислил величину действующих сил в направлении координатных осей, а затем связал их с приращением расстояния dx и dy . Полученное им в результате уравнение оси струи, вытекающей из отверстия произвольной формы под произвольным углом к сносному потоку, имеет следующий вид:

$$x = -y t g \alpha + \frac{c}{4} * \frac{\rho_0 \omega_0^2}{\rho v^2} * \frac{y^2}{\epsilon l \cos \alpha} \left(l + 0,125 \frac{y}{\cos \alpha} \right), \quad (11)$$

где: ϵ, l – размеры сопла сносного потока; ось x направлена навстречу сносному потоку

Работа Н.М. Соколовой, [27] посвященная исследованию вертикальных воздушных фонтанов, распространяющихся в сносном потоке. Н.М. Соколова рассматривала уравнения количества движения, составленные в проекциях на оси координат. Ею выведены общие формулы, определяющие координаты оси сносимого компактного плоского воздушного фонтана.

Для сносимой изотермической струи, вытекающей из отверстия щелевидной формы, формула имеет вид:

$$x = \frac{K_n}{2} * \frac{\rho_0 \omega_0^2}{\rho v^2} * \frac{z^2}{\epsilon}, \quad (12)$$

где: K_n – постоянный множитель.

Схожее уравнение получено также Я.М. Визелем, Й.Д. Мостинским. [25] Численный множитель $K_n = 2,85$.

Приняв за основу условие равновесия между центробежной силой, действующей на элемент струи и аэродинамической силой, которая изгибает струю, Г.С. Шандров [28], получил уравнение, связывающее координаты оси струи:

$$\frac{y}{d} = \frac{\Pi \text{ntg}^{\frac{\alpha}{2}}}{2 C_n q} \left[\sqrt{\left(\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{2 C_x q x}{\Pi d} \right)^2 - 1} + \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{2 C_x q x}{\Pi d} \right]. \quad (13)$$

Так же как и некоторые предыдущие исследователи, используя теоретические разработки Г.Н. Абрамовича [7], А.М. Эпштейн [29] получил уравнение оси сносимой неизотермической струи:

$$\left(\frac{y}{d}\right)^2 = \frac{1}{q} \left(\frac{x}{d}\right) n^2 + \frac{1}{2} A_v \left(\frac{u_0}{w}\right)^3 \left(\frac{x}{d}\right)^2 n^2, \quad (14)$$

где A_v – критерий Архимеда; n – экспериментальная постоянная;

И.В. Календайте совместно с М.Я. Залишаускас [30] вывели уравнение траектории свободной плоской струи при различных давлениях с двух сторон:

$$x = \frac{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - k^2 y^2 - 2k \sin \alpha * y}}{k}, \quad (15)$$

где k – безразмерный коэффициент.

Б.Г. Худенко [31] в 1966 г. предложил методику расчета деформации осей двойных плоскопараллельных струй при учете перепада статического давления на участке сближения.

Также Б.Г. Худенко [31] предположил, что турбулентные пульсации в пространство между струями не проникают. Движение воздуха в этой области имеет потенциальный характер и происходит при отсутствии потерь полного давления. Чтобы выразить профили скоростей аналитически он воспользовался формулой Г. Шлихтинга [32]. Для начального участка коэффициент разряжения между струями выражается так:

$$\overline{p}_n = \frac{\Delta p}{\rho \omega_0^2 / 2} = \left[\frac{(\varphi_1 - \varphi_1) A_1 - \varphi_1}{\varphi_2} \right]^2, \quad (16)$$

для основного участка:

$$\overline{p}_{осн} = \frac{A_1}{4 A_2 a_0 \varphi_{cp} \bar{x}'}, \quad (17)$$

где: A_2 – теоретическая константа; a_0 – экспериментальная константа; $\bar{x}' = \bar{x} + \overline{x_{пол}}$ – относительной расстояние сечения от полюса струи.

Из [1] этого, следует что остальные константы равны $\varphi_1 = 0,981$; $\varphi_2 = -2,04$; $A_1 = 0,45$; $\varphi_{cp} = 2,412$

Координаты оси изогнутой газовой струи:

$$\overline{y}_{осн} = \overline{y}_n + \frac{A_1^2}{16 A_2 a_0 \varphi_{cp}} \left[\overline{x}'_n + \bar{x}' \left(\ln \frac{\bar{x}'}{\bar{x}} - 1 \right) \right], \quad (18)$$

Влияние эжекции воздуха из межструйного пространства не учитывалось и предполагалось, что оси смешивающихся струй распространяются прямолинейно. Повышением статического давления на участке, где происходит смешение струй, в расчетах пренебрегалось.

Используя теоретические разработки в 1970 г. В.А. Арутюнов и Ю.М. Перепелкин [12], получили уравнение длины зоны циркуляции, образующейся при налипании плоской струи на поверхность:

$$\frac{x}{\epsilon_0} = \frac{0,567 \sin^2 \Theta_1 - 1,8 \sin^2 \Theta_1 (\eta - 0,8 \eta^{25} + 0,25 \eta^4) - 0,158 \eta \Theta_1}{(\eta - 0,8 \eta^{25} + 0,25 \eta^4)^2 \Theta_1 \sin \Theta_1} \quad (19)$$

Где

$$\eta = \frac{\sigma}{\sigma_{cp}}. \quad (20)$$

Чтобы описать распределение скоростей в плоской струе, налипающей на поверхность, они применили формулу для слоя конечной толщины Г. Шлихтинга [32].

Исследования А.Л. Пшеничникова [33] были направлены на изучение плоских приточных струй, сносимых боковым потоком и ограниченными стенками.

Пользуясь теоремой о количестве движения, автор вывел уравнение изогнутой оси струи в сносящем потоке в следующем виде:

$$x = -\frac{C_n}{2} * \frac{\rho_0 \omega_0^2}{\rho v^2} * \frac{H^2}{\epsilon_0} \left[\ln \left(1 - \frac{y}{H} \right) + \frac{y}{H} \right]. \quad (21)$$

Это уравнение А.Л. Пшеничников рекомендует применять для приближенного определения формы оси плоской струи в сносящем потоке ограниченных размеров при значении коэффициента $C_n = 6,84$. И как показал анализ теоретических и экспериментальных работ, уравнения траектории оси плоской струи можно записать в общем виде:

$$\frac{x}{\epsilon_0} = C \frac{\rho_0 \omega_0^2}{\rho v^2} \left(\frac{y}{\epsilon_0} \right)^n \quad (22)$$

где C и n – постоянные, значения которых отличаются у разных исследователей.

В настоящее время были проведены исследования А.Ю. Григорьевым и И.А. Рубцовым [16], [17], посвященные изучению численных методов решения задач теплообмена в проеме с завесой на базе уравнений Рейнольдса, данная методика была апробирована экспериментальными исследованиями [18].

В основе изучения движения вязкого газа и вывода лежат следующие общие допущения :

1. Параметры газа удовлетворяют закону Клапейрона-Менделеева. Газ совершенен:

$$p = \rho \cdot R \cdot T . \quad (23)$$

2. Динамический коэффициент вязкости μ функция только температуры газа T и вычисляется по формуле Сатерленда:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \frac{T_0 + T_s}{T + T_s} \quad (24)$$

В проекциях на оси прямоугольной плоской системы координат уравнения Рейнольдса динамики турбулентного течения вязкого газа были выведены формулы

-на ось x :

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho \cdot F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + A_\tau) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + A_\tau) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + A_\tau) \operatorname{div} \vec{V} \right), \quad (25)$$

-на ось y :

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho \cdot F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + A_\tau) \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + A_\tau) \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + A_\tau) \operatorname{div} \vec{V} \right), \quad (26)$$

Для того чтобы замкнуть систему уравнений, используем уравнение баланса энергии газа:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} - \frac{dp}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda + A_q) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\lambda + A_q) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (27)$$

и уравнение неразрывности течения газа:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot \operatorname{div} \vec{V} = 0. \quad (28)$$

Для условий течения воздуха числа Прандтля Pr_t и Pr для турбулентного и ламинарного течения близки друг к другу и примерно равны 1, поэтому правая часть уравнения баланса энергии (27) примет вид:

$$\frac{c_p}{Pr} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + A_\tau) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + A_\tau) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\}. \quad (29)$$

Исходя из условия, что $c_p dT = c_v dT + d\left(\frac{p}{\rho}\right)$, а $\operatorname{div} \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}$, то левая часть уравнения (27) может быть преобразована к следующему виду:

$$\begin{aligned} \rho \cdot c_p \frac{dT}{dt} - \frac{dp}{dt} &= \rho \cdot \left(c_v \frac{dT}{dt} + \frac{d}{dt} \left(\frac{p}{\rho} \right) \right) - \frac{dp}{dt} = \rho \cdot c_v \cdot \frac{dT}{dt} + \rho \cdot \frac{\frac{dp}{dt} \cdot \rho - p \cdot \frac{d\rho}{dt}}{\rho^2} - \frac{dp}{dt} = \rho \cdot c_v \cdot \frac{dT}{dt} - \frac{p}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \\ &= \rho \cdot c_v \cdot \frac{dT}{dt} + p \cdot \operatorname{div} \vec{V}. \end{aligned} \quad (30)$$

С учетом выражений (29) и (30) уравнение (27) примет вид:

$$\rho \cdot \frac{dT}{dt} + \frac{p}{c_v} \cdot \operatorname{div} \vec{V} = \frac{k}{Pr} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + A_\tau) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + A_\tau) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\}, \quad (31)$$

где $k = c_p/c_v$,

Таким образом, для определения шести неизвестных параметров течения газа в проеме (полей составляющих вектора скорости течения газа и, полей температуры T , плотности, давления газа и его вязкости) составлена система шести уравнений (23, 24, 25, 26, 28, 31).

По полученным результатам для решения задачи уравнения, была выбрана модель Болдуина-Ломакса, которая была сформулирована в 1978г. Эта модель, как и все алгебраические модели турбулентности, проста в реализации, и редко вызывает вычислительные трудности и вполне пригодна для простого плоского дозвукового течения. Так же написана специализированная программа расчета параметров течения воздуха в различных проемах, оборудованных ВТЗ.

Имеющиеся некоторые расхождения в вышеприведенных формулах для вычисления траектории оси струи объясняются следующим:

- измерение скоростей на значительном удалении от сопла представляет определенную трудность, что вносит соответствующую погрешность;

- исследования для определения оси струи проводились различными способами, с различной погрешностью проводимого эксперимента;

- не одинаково вероятно было и качество применявшихся сопел.

Многие исследователи в своих выводах показывают что, как траектория оси струи может быть определена одним комплексным гидродинамическим параметром, а именно соотношением динамических давлений в потоке и струе. Соответственно, силы давления, которые воздействуют на струю, практически не зависят от соотношения значений плотности и скорости смешивающихся потоков отдельно.

Литература

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. / М.- Госэнергоиздат, 1953. – 452 с.
2. *Абрамович Г.Н.* Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. / М- Госэнергоиздат, 1948. – 351 с.
3. *Абрамович Г.Н.* Теория турбулентных струй. /М. - Наука – 1980. С. 582.
4. *Абрамович Г.Н., Голубева В.А. Макаров И.С., Макаров Л.Е.,* Теоретическое и экспериментальное исследование процессов смешения газовых потоков в элементах ВРД специальных систем. / Технический отчет МАИ. – М., 1972. Ч.1. -90с.; - 1974. Ч.2-150с.
5. *Акантов Н.И.* Круглая турбулентная струя в поперечном потоке. / Изв. АН СССР. Сер. МЖГ. – 1969. – №6 – С.102-125.
6. *Андронов Ф.И.* Российская специфика выбора воздушных тепловых завес // Журнал "СОК", 2004. №10.
7. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя т1. / М.-Машиностроение-2001.
8. *Арутюнов В.А., Перепелкин Ю.М.* Исследование распространения плоской струи в камере. Изв. Вузов. Черная металлургия. – 1969. - №11. – С. 71-77
9. *Афанасьев А.В.* Оценка эффективности проектного решения промышленного здания на начальной стадии. Автореферат диссертации канд. тех наук 05.23.01- Афанасьев, Александр Викторович- Москва.-2007.
10. *Бараненко А.В., Ховалыг Д.М., Цой А.П., Синицина К.М.* Энергоэффективность и экологическая безопасность техники низких температур // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2014. № 1(14).
11. *Батурин В.В. Шепелев.* Воздушные завесы. / «Отопление и вентиляция». 1936. № 5.
12. *Григорьев А.Ю., Рубцов И.А., Шилец А.А.* Моделирование пусковых режимов работы тепловой завесы // Вестник Международной академии холода. 2012. № 3. С. 32–35.
13. *Григорьев А.Ю., Рубцов И.А., Воронов Д.А., Савенко Н.А., Райков А.А., Баваян Х.С.* Экспериментальные и расчетные исследования пусковых режимов работы воздушно-тепловой завесы // Вестник Международной академии холода. 2015. № 2. С. 40–45.
14. *Григорьев А.Ю., Григорьев К.А., Брайнин А.Я.* Экспериментальное исследование аэро- и термо-динамических процессов в проемах, оборудованных тепловыми завесами // Вестник Международной академии холода. 2014. № 1. С. 23–26.
15. *Бутаков С.Е., Столлер В.Д.* Воздушные завесы в горячих цехах – В кн. Вентиляция в металлургической промышленности. Под. ред. В.А. Штомберга. – М., 1968. –С. 145–164.
16. *Иванов Ю.В.* Плоская струя во внешнем поперечном потоке. // Известия АН ЭССР. – Таллин. – 1953. – т.П.- №2. С.33–68.

17. *Иванов Ю.В.* Плоская струя во внешнем поперечном потоке. // Известия АН ЭССР. – Таллин. – 1953. – т. II. – № 2. – С.33–68
18. *Палатник И.Б., Темирбаев Д.Ж.* Закономерности распространения осесимметричной воздушной струи в сносимом однородном потоке. В кн.: Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики – Алма-Ата – 1967. – Вып.4. – С.68-82.
19. Newman, B. G. The Deflexion of Plane Jets by Adjacent Boundaries– Coanda Effect Boundary Layer and Flow Control, edited by G. V. Lachmann, Vol. 1. Pergamon Press. Oxford. 1961 pp. 232–264.
20. *Шепелев И.А.* Основы расчета воздушных завес, приточных струй и пористых фильтров. –М.: Стройиздат. 1950.
21. *Визель Я.М., Мостинский И.Л.* Искривление струи в сносимом потоке. / ИФЖ. – 1965, т.8. № 2. – С. 58–67.
22. *Шепелев И.А.* Аэродинамика воздушных потоков в помещении. – М., 1978, -145с.
23. *Соколова Н.М.* Исследование воздушных вертикальных фонтанов, распространяющихся в сносимом потоке.: Автореферат дис. канд. Техн. Наук, М., 1971. – 20с.
24. *Шандров Г.С.* Истечение из канала в неподвижную и движущуюся среду. // ЖТФ. – 1957. т. 27. – № 1. – С. 92–108.
25. *Эпштейн А.М.* О форме оси турбулентной струи в неограниченном горизонтальном потоке. // ИФЖ. – 1965. – № 4. – т. IX. – С.45–54.
26. *Календайте И.В., Залишауская М.П.* Искривление плоской свободной струи при разных давлениях с обеих сторон. / Сантехническое гидротехническое строительство. Основание и фундаменты. – Каунас. – 1970. – С. 5153.
27. *Худенко Б.Г.* Деформация осей плоско-параллельных струй при их взаимодействии. Изв. вузов. Авиационная техника. – 1996. – № 2. – С.54–62.
28. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. / Наука,-1973.33. Пшеничников А.Л. Плоская приточная струя, сносимая боковым потоком воздуха. В ен.: Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха в промышленных зданиях. Труды ЦНИИ Промиздат. – 1972. – № 26. – С. 65–69.

References

1. Abramovich G.N. Prikladnaja gazovaja dinamika./ M.- Gosjenergoizdat, 1953. – 452 s.
2. Abramovich G.N. Turbulentnye svobodnye strui zhidkostej i gazov. / M- Gosjenergoizdat, 1948. – 351 s.
3. Abramovich G.N. Teorija turbulentnyh struj. /M. - Nauka – 1980. S. 582.
4. Abramovich G.N., Golubeva V.A. Makarov I.S., Makarov L.E., Teoreticheskoe i jeksperimental'noe issledovanie processov smeshenija gazovyh potokov v jelementah VRD special'nyh sistem./ Tehnicheskij otchet MAI. – М., 1972. Ch.1. -90s.; - 1974. Ch.2-150s.
5. Akantov N.I. Kruglaja turbulentnaja struja v poperechnom potoke./ Izv. AN SSSR. Ser. MZhG. – 1969. – №6 – S.102-125.
6. Andronov F.I. Rossijskaja specifika vybora vozdušnyh teplovyh zaves // Zhurnal "SOK", 2004. №10.
7. Anur'ev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja t1. / M.-Mashinostroenie-2001.
8. Arutjunov V.A., Perepelkin Ju.M. Issledovanie rasprostraneniya ploskoj strui v kamere. Izv. Vuzov. Chernaja metallurgija. – 1969. - №11. – S. 71-77
9. Afanas'ev A.V. Ocenka jeffektivnosti proektnogo reshenija promyshlennogo zdanija na nachal'noj stadii. Avtoreferat dissertacii kand. teh nauk 05.23.01- Afanas'ev, Aleksandr Viktorovich- Moskva.-2007.
10. Baranenko A.V., Hovalyg D.M., Coj A.P., Sinicina K.M. Jenergojeffektivnost' i jekologicheskaja bezopasnost' tehniki nizkih temperatur // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie». 2014. № 1(14).
11. Baturin V.V. Shepelev. Vozdušnyje zavesy./ «Otoplenie i ventiljacija». 1936. № 5.
12. Grigor'ev A.Ju., Rubcov I.A., Shilec A.A. Modelirovanie puskovyh rezhimov raboty teplovoj zavesy // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda. 2012. № 3. S. 32–35.
13. Grigor'ev A.Ju., Rubcov I.A., Voronov D.A., Savenko N.A., Rajkov A.A., Bavejan H.S. Jeksperimental'nye i raschetnye issledovanija puskovyh rezhimov raboty vozdušno-teplovoj zavesy // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda. 2015. № 2. S. 40–45.
14. Grigor'ev A.Ju., Grigor'ev K.A., Brajnin A.Ja. Jeksperimental'noe issledovanie ajero- i termo-dinamicheskikh processov v proemah, oborudovannyh teplovyimi zavesami // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda. 2014. № 1. S. 23–26.
15. Butakov S.E., Stoller V.D. Vozdušnyje zavesy v gorjachih cegah – V kn. Ventiljacija v metallurgicheskoj promyshlennosti. Pod. red. V.A. Shtomberga. – М., 1968. –S. 145–164.
16. Ivanov Ju.V. Ploskaja struja vo vneshnem poperechnom potoke. // Izvestija AN JeSSR. – Tallin. – 1953. – т. II. -№2. S.33–68.

17. Ivanov Ju.V. Ploskaja struja vo vneshnem poperechnom potoke. // *Izvestija AN JeSSR*. – Tallin. – 1953. – t.II.-№ 2.– S.33–68
18. Palatnik I.B., Temirbaev D.Zh. Zakonomernosti rasprostraneniya osesimmetrichnoj vozduшной strui v snosjashhem odnorodnom potoke. V kn.: *Problemy teplojenergetiki i prikladnoj teplofiziki* – Alma-Ata – 1967.– Vyp.4. – S.68–82.
19. Newman, B. G. The Deflexion of Plane Jets by Adjacent Boundaries– Coanda Effect Boundary Layer and Flow Control, edited by G. V. Lachmann, Vol. 1. Pergamon Press. Oxford. 1961 pp. 232–264.
20. Shepelev I.A. Osnovy rascheta vozduшных zaves, pritochnyh struj i poristyh fil'trov. –M.: Strojizdat. 1950.
21. Vizel' Ja.M., Mostinskij I.L. Iskrivlenie strui v snosjashhem potoke. / *IFZh*. – 1965, t.8. № 2. – S. 58–67.
22. Shepelev I.A. Ajerodinamika vozduшных potokov v pomeshhenii. – M., 1978, -145s.
23. Sokolova N.M. Issledovanie vozduшных vertikal'nyh fontanov, rasprostranjajushhihsja v snosjashhem potoke.: Avtoreferat dis. kond. Tehn. Nauk, M., 1971. – 20s.
24. Shandrov G.S. Istechenie iz kanala v nepodvizhnuju i dvizhujushhujusja sredu. // *ZhTF*. – 1957. t. 27. – № 1. – С. 92–108.
25. Jepshtejn A.M. O forme osi turbulentnoj strui v neogranicheskom gorizonta'nom potoke. // *IFZh*. – 1965. –№ 4. – t. IX. – С.45–54.
26. Kalendajte I.V., Zalishauskaja M.P. Iskrivlenie ploskoj svobodnoj strui pri raznyh davlenijah s obeih storon. / *Santehnicheskoe gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. Osnovanie i fundamenty*. – Kaunas. – 1970. – S. 5153.
27. Hudenko B.G. Deformacija osey plosko-parallel'nyh struj pri ih vzaimodejstvii. *Izv. vuzov. Aviacionnaja tehnika*. – 1996. – № 2. – S.54–62.
28. Shlihting G. Teorija pograničnogo sloja. / *Nauka*,-1973.33. Pshenichnikov A.L. Ploskaja pritochnaja struja, snosimaja bokovym potokom vozduha. V en.: *Otoplenie, ventiljacija i kondicionirovanie vozduha v promyshlennyh zdaniyah*. Trudy CNII Promizdat. – 1972. – № 26. – S. 65–69.

Статья поступила в редакцию 21.11.2016 г.