

УДК 614.841

Режимы движения продуктов горения в вертикальном канале системы дымоудаления

Combustion products motion modes in a smoke exhaust system vertical channel

*А.А. Кузьмин,
канд.пед.наук доцент,
Н.Н. Романов,
канд.тех.наук, доцент,
А.А. Пермяков,
канд.пед.наук
ФГБОУ ВО Санкт-
Петербургский университет
ГПС МЧС России*

*A.A. Kuzmin,
Ph.D. of Pedagogic Sciences,
Docent,
N.N. Romanov,
Ph.D. of Engineering Sciences,
Docent,
A.A. Permyakov,
Ph.D. of Pedagogic Science
Saint-Petersburg university of
State fire service of EMERCOM
of Russia*

Аннотация:

В статье исследованы факторы, влияющие на режим движения продуктов горения по вертикально ориентированным каналам систем дымоудаления. Предложено пренебречь инерциальными силами, что предполагает изучение воздействия трех сил: силы гравитации, силы аэродинамического сопротивления и силы избыточного давления. Установлено, что зависимость давления газового потока от высоты газового столба при неизотермическом течении имеет нелинейный характер. Показано, что переход течения продуктов горения по вертикально ориентированному каналу системы дымоудаления от ламинарного режима к турбулентному происходит при появлении возвратного потока, который возникает при положительном значении градиента продольной скорости.

Ключевые слова: дымоудаление, продукты горения, вертикальный канал, турбулентное течение, ламинарное течение, поле скоростей, возвратный поток, спутный поток.

Abstract:

We researched factors affecting the combustion products motion mode along vertically oriented channels of smoke exhaust system. We proposed to neglect inertial forces, which involves studying the effects of three forces: gravity, aerodynamic drag, and overpressure. It is determined that the dependence of the gas flow pressure on the gas column height in a non-isothermal flow is nonlinear. It is shown that flow of combustion products along a vertically oriented channel of the smoke exhaust system changes from laminar to turbulent mode when a return flow appears. It occurs when the longitudinal velocity gradient is positive.

Key words: smoke exhaust, combustion products, vertical channel, turbulent flow, laminar flow, velocity field, return flow, cocurrent flow.

Системы дымоудаления в современных жилых и производственных зданиях изобилуют вертикально ориентированными каналами, в которых происходят процессы тепломассопереноса, существенно влияющие на развитие внутренних пожаров. Существует обширная литература [1÷6], посвященная анализу процессов конвективного тепломассопереноса в длинных вертикальных каналах вдоль неравномерно нагретых поверхностей стенок каналов. Многие методы теоретических исследований и экспериментальные данные, проведенные, например, при изучении режимов охлаждения активной зоны реакторов в аварийной ситуации, могут быть использованы при анализе процессов тепломассопереноса в условиях свободной или смешанной конвекции продуктов горения в вертикально ориентированных каналах систем дымоудаления.

Изучение процессов тепломассопереноса на пожарах в ограждениях позволяет сделать вывод, что при медленном движении продуктов горения вначале газовый поток двигается в ламинарном режиме, а начиная с некоторой высоты канала ламинарный режим протекания может перейти в турбулентный. Однако, главная причина перехода ламинарного режима в турбулентный, по существу до сих пор не выявлены.

Как известно, турбулентность появляется вследствие неустойчивости ламинарного течения, и обычно она связана с существенной ролью нелинейных инерционных членов (слагаемые, заключенные в квадратные скобки) в уравнении Навье-Стокса [3].

$$\rho \cdot \frac{dw}{d\tau} = \rho \cdot g - \nabla p + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial w_i}{\partial y} + \frac{\partial w_j}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \cdot \delta_{i,j} \cdot \frac{\partial w_k}{\partial z} \right], \quad (1)$$

где ρ – плотность продуктов горения;

w – вектор скорости потока продуктов горения;

g – ускорение свободного падения;

P – давление продуктов горения;

$\delta_{i,j}$ – символ Кронекера;

μ – коэффициент динамической вязкости продуктов горения.

Нелинейные инерционные члены в уравнении Навье-Стокса существенно влияют на интенсивность процессов тепломассопереноса при значительных значениях чисел Рейнольдса Re . При медленном движении газовой среды и относительно незначительной величины вязкости продуктов горения, нелинейные инерционные члены уравнения Навье-Стокса позволяют упростить расчеты тепломассопереноса.

Ламинарный и турбулентный режимы движения продуктов горения обуславливают существенные различия значений аэродинамического сопротивления и различия в интенсивности процессов теплообмена, которыми определяется такой важный фактор распространения пожара как перепад температуры между необогреваемой поверхностью каналов и охлаждающим воздухом. Решение этого вопроса предполагает особое внимание, прежде всего к чисто физической стороне решаемой проблемы, в то время как большинство работ, посвященных процессам тепломассообмена на пожаре, содержат только эмпирический материал, в то время как необходима разработка методики решения дифференциальных уравнений, описывающих адекватную математическую модель протекания и охлаждения продуктов горения в вертикальных каналах системы дымоудаления.

Рассмотрим стационарное вертикальное движение продуктов горения вдоль ограждений вертикального канала системы дымоудаления, который сообщается с объемом помещения, охваченного пожаром и атмосферой. Считаем, что одна из стенок канала, обращенная к пожару, неравномерно нагрета, а противоположная вследствие охлаждения воздухом считается теплоизолированной. Условия конвективного теплообмена предполагают воздействие на частицы, образующие продукты горения, четырех сил: силы инерции, силы тяжести, силы сопротивления, силы давления, сумма которых при стационарном режиме движения равна нулю. Для небольших скоростей, характерных для движения продуктов горения на пожаре, существует возможность пренебречь инерциальными силами, что предполагает изучение воздействия трех сил: силы гравитации, силы аэродинамического сопротивления, и силы избыточного давления. Если течение продуктов горения по вертикальным каналам системы дымоудаления считать установившемся, то силы, действующие на отдельные частицы должны находиться в состоянии равновесия. В этом случае сумма ускоряющих сил по абсолютной величине должна быть равна сумме сил тормозящих. Для относительно небольшой протяженности канала течение продуктов горения можно считать изотермическим, при этом подразумевается, что это движение вызывается силой давления, которое уменьшается по абсолютной величине в направлении течения.

Исходными при решении такой термодинамической задачи являются три взаимосвязанные величины: скорость газового потока, его давление и абсолютная температура продуктов горения.

Если процесс на начальном участке вертикального канала считать изотермическим, то сила давления уменьшается вдоль потока, поскольку является единственной движущей силой. В дальнейшем движение потока продуктов горения в канале становится неизотермическим, при этом сила гравитации им⁶

$$\rho \cdot g = \rho_0 \cdot (1 - \beta \cdot T) \cdot g, \quad (2)$$

где β – коэффициент объемного расширения продуктов горения;

T – температура продуктов горения, усредненная по сечению канала;

ρ_0 – плотность продуктов горения при их входе в канал дымоудаления.

В относительно небольшой высоте dz столба продуктов горения выталкивающая сила направлена по высоте канала вверх, а сила гравитации вниз, поэтому их сумму можно записать как:

$$dP - \rho \cdot g \cdot dz = dP - \rho_o \cdot g \cdot dz + \rho_o \cdot \beta \cdot T \cdot g \cdot dz, \quad (3)$$

Поскольку сила гравитации направлена в сторону силы давления, то движущая сила движения потока продуктов горения по вертикальному каналу системы дымоудаления состоит из силы гидростатического давления и силы гидродинамического давления:

$$dP = d\dot{P} + \rho_o \cdot \beta \cdot T \cdot g \cdot dz, \quad (4)$$

Учитывая значительную температуру продуктов горения в их движении по вертикальному каналу, существенной причиной становится выталкивающая сила, которая уравнивает силу аэродинамического сопротивления dR :

$$\frac{dR}{dz} = \frac{d\dot{P}}{dz} + \rho_o \cdot \beta \cdot g \cdot T, \quad (5)$$

Как показано в [4] изменение силы аэродинамического сопротивления продуктов горения по высоте незначительно, в то время как величина выталкивающей силы изменяется, поэтому зависимость давления газового потока от высоты газового столба при неизотермическом течении имеет нелинейный характер (рис. 1):

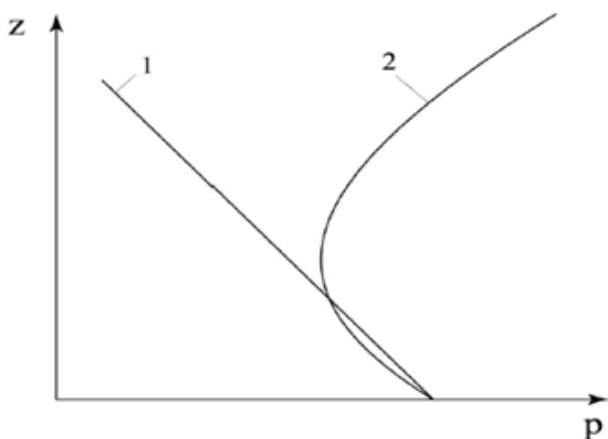


Рис. 1. Зависимость гидродинамического давления от высоты канала 1 – изотермическое течение, 2 – неизотермическое течение

На определенной высоте линия давления становится параллельной оси ординат Z , при этом сила давления газового потока становится равна нулю, а сила аэродинамического сопротивления уравнивается выталкивающей силой.

При исследовании трансформации поля скоростей предполагается, что продукты горения втека-

ют в канал системы дымоудаления при постоянной скорости, а уже внутри канала происходит деформация поля скоростей. Для относительно небольших участков изменение температуры продуктов горения незначительно, поэтому здесь корректно применение законов изотермического течения. Если значение числа Рейнольдса Re невелико, т.е. режим движения ламинарный, то размеры участка динамической стабилизации соизмерим с шириной канала системы дымоудаления и на этом участке профиль поля скоростей сформировался.

Далее участок динамической стабилизации потока продуктов горения трансформируется в участок тепловой стабилизации, когда происходит медленная деформация параболического профиля поля скоростей газового потока линия 2 на рис. 1. Поэтому в уравнении Навье-Стокса (1) существует возможность не учитывать инерционную составляющую, предполагая, что каждая частица продуктов горения подвергается воздействию трех сил: силы гравитации, силы аэродинамического сопротивления и силы давления, при этом действие гидростатического давления столба продуктов горения исключается из анализа, а выталкивающая сила, обусловленная значительной температурой продуктов горения направлена вверх.

При наступлении стабилизации потока в канале дымоудаления можно выделить две зоны: в первой зоне продукты горения прогреты, а во второй зоне еще не прогреты и их температура равна начальной T_o (рис. 2).

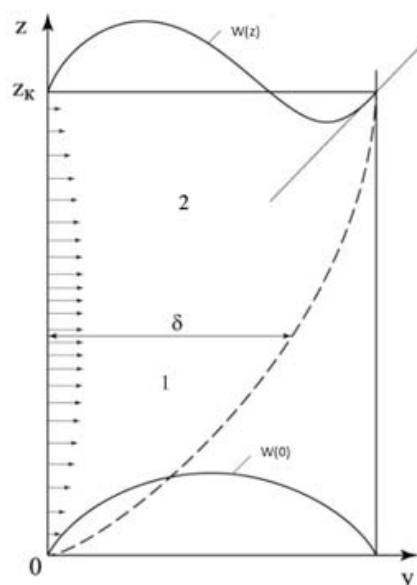


Рис. 2. Схема потока продуктов горения в вертикальном канале δ – толщина теплового пограничного слоя; $w(0)$ – профиль скорости в начале канала; $w(z)$ – профиль скорости при возвратном течении.

В первой, т.е. прогретой зоне пограничного слоя на частицы продуктов горения воздействуют две силы: сила гравитации и сила давления, а вне этой зоны исключительно сила давления. По мере движения продуктов горения по вертикальному каналу величина силы гравитации изменяется, т.к. изменяется их температура, поскольку изменяется плотность газовой среды и, соответственно, изменяется толщина пограничного слоя. Это вызывает медленное перемещение потока продуктов горения из внешнего слоя в нагретый слой, непосредственно примыкающий к обогреваемой стенке вертикального канала. Поскольку предполагается, что режим течения остается стационарным, то суммарный расход газового потока остается постоянным, но толщина нагретой зоны в пограничном слое изменяется, как и скорость перемещения отдельных частиц продуктов горения. Частицы продуктов горения, находящиеся во второй, непрогретой зоне начинают двигаться все медленнее и медленнее, при этом происходит уменьшение величины градиента давления. В дальнейшем возможна реализация двух вариантов:

- скорость перемещения частиц во второй зоне не успеет уменьшиться до минимума до того момента, когда весь газовый поток остынет, охлажденный слой контактирует с адиабатической стенкой канала и участок стабилизации закончится, при этом варианте продукты горения будут перемещаться по каналу вверх в ламинарном режиме;
- продукты горения не успевают остывать, а скорость в первой зоне уменьшится до минимума и будет изменяться далее до перехода к спутному (возвратному) течению. Возникающее возвратное течение газового потока будет иметь место до тех пор, пока температура продуктов горения окончательно не уравнивается с окружающей средой и будет протекать до верхней кромки канала. Возвратное перемещение продуктов горения из окружающей атмосферы обратно в канал будет развиваться в соответствии с профилем скорости, которая зависит от геометрии канала, а средняя температура продуктов горения на срезе канала будет зависеть, в том числе, от температуры воздуха вне канала, при этом режим возвратного течения продуктов горения, изменяясь во времени, может стать турбулентным. Эффект турбулизации возвратного потока был предсказан В.Н. Волковым и В.К. Ли-Орловым и наблюдался экспериментально в ходе моделирования систем охлаждения обмоток силовых трансформаторов [7].

Для создания математической модели процесса конвекции в вертикальном канале системы противодымной вентиляции используются дифференциальные уравнения в трактовке Буссинека при пренебрежении инерциальными силами в уравнениях Навье-Стокса [8]:

$$\frac{\partial P(y,z)}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial P(y,z)}{\partial z} - Gr \cdot T = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (6)$$

Уравнение непрерывности можно записать как:

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

Уравнение теплопроводности учитывает значение температуры потока T на срезе канала:

$$u \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (8)$$

где u, v – продольная и поперечная составляющие скорости потока продуктов горения в вертикальном канале системы дымоудаления соответственно;

Gr, Pr – числа Грасгофа и Прандтля, определенные для температуры потока на срезе канала.

В ходе формулирования граничных условий необходимо задать усредненное значение расхода продуктов горения, которое связано, в том числе и с числом Рейнольдса Re . Краевые условия решения уравнений (7÷8) предполагают:

Если $y=0$ то $q=dT/dy$ и $u=v=0$; если $y=1$, то $dT/dy=0$ и $u=v=0$;

если $z=0$, то $T(0,y)=0$; $p=0$,

где q – плотность теплового потока между продуктами горения и внутренней поверхностью канала системы дымоудаления.

Для решения поставленной задачи необходимо проинтегрировать уравнение (7) поперек канала системы дымоудаления по оси ординат:

$$\frac{\partial u}{\partial y} - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_0 = \frac{dp}{dz} \cdot y - Gr \cdot \int_0^y T \cdot dy, \quad (9)$$

После повторного интегрирования получаем:

$$u = \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_0 \cdot y + \frac{dp}{dz} \cdot \frac{y^2}{2} - Gr \cdot \int_0^y dy \cdot \int_0^y T \cdot dy, \quad (10)$$

Исходя из краевых условий:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_0 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{dp}{dz} \cdot \frac{y^2}{2} + \int_0^y dy \cdot \int_0^y T \cdot dy, \quad (11)$$

тогда:

$$u = -\frac{1}{2} \cdot \frac{dp}{dz} \cdot (y-y^2) + Gr \cdot \varphi(z, y), \quad (12)$$

где

$$\varphi(z, y) = y \cdot \int_0^1 dy \cdot \int_0^y T \cdot dy - \int_0^1 dy \cdot \int_0^y T \cdot dy, \quad (13)$$

При постоянном расходе газового потока:

$$\langle u \rangle = \int_0^1 u \cdot dy = -\frac{1}{12} \cdot \frac{dp}{dz} + Gr \cdot \int_0^1 \varphi(z, y) \cdot dy; \quad (14)$$

определяются величины градиента давления продуктов горения:

$$-\frac{dp}{dz} = 12 \cdot \left[\langle u \rangle - Gr \cdot \int_0^1 \varphi(z, y) \cdot dy \right], \quad (15)$$

и перепада давления:

$$-p(z) = 12 \cdot \left[\langle u \rangle z - Gr \cdot \int_0^z dz \int_0^1 \varphi(z, y) \cdot dy \right], \quad (16)$$

При подстановке уравнения (14) в выражение (16) можно определить профиль скорости движения потока продуктов горения по каналу системы дымоудаления:

$$u = 6 \cdot \left[\langle u \rangle - Gr \cdot \int_0^1 \varphi(z, y) \cdot dy \right] \cdot (y-y^2) + Gr \cdot \varphi(z, y), \quad (17)$$

Из уравнения (9) после несложных преобразований можно получить выражение для гидравлического сопротивления вертикально ориентированного канала:

$$F_c = \int_0^z \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_0 - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_1 \right] \cdot dz = -p(z) + Gr \cdot \int_0^z dz \cdot \int_0^1 T \cdot dy, \quad (18)$$

После сложения уравнений непрерывности (7) и теплопроводности (8), получаем:

$$\frac{\partial(T \cdot u)}{\partial z} + \frac{\partial(T \cdot v)}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (19)$$

Поскольку гидродинамические параметры потока продуктов горения связаны с их температурой, то пропустив промежуточные преобразования при значениях $z=z_k$ и $\delta=1$ можно получить выражение для профиля скорости на момент достижения тепловым слоем обогреваемой поверхности канала системы дымоудаления:

$$u = 6 \langle Re \rangle \left[1 - \frac{K \cdot q(z_k)}{80} \right] (y-y^2) + \frac{1}{24} K \cdot q(z_k) [(1-y) - (1-y)^4], \quad (20)$$

Для тех же условий получается выражение для градиента давления внутри потока продуктов горения:

$$-\frac{dp}{dz} = 12 \cdot \langle Re \rangle \left[1 - \frac{K \cdot q(z_k)}{80} \right], \quad (21)$$

где $K = \frac{Gr}{\langle Re \rangle}$ – конвективный параметр.

Таким образом, условием перехода течения продуктов горения по вертикально ориентированному каналу системы дымоудаления от ламинарного режима к турбулентному является появление возвратного (спутного) потока, который возникает при положительном значении градиента продольной скорости газового потока.

Литература

1. Остроумов Г.А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. -М.: Гостехиздат, 1952.
2. Семенов О.Ю., Дёмко А.И. Задача конвективного теплообмена на обтекаемой плоской пластине в оптическом расходомере газа и жидкости / Вестник кибернетики. 2019. №2(34). С. 15-26.
3. Гусев С.Е., Шкловер Г.Г. Свободноконвективный теплообмен при внешнем обтекании тел / Б. Гебхарт, Й. Джалурия, Р.Л. Махаджан – М.: Энергоатомиздат, 1992
4. Гебхарт Б. и др. Свободно конвективные течения, тепло- и массообмен. М.: Мир, 1991.
5. Абрамкина Д.В., Абрамян А.А., Шевченко-Эннс Э.Р. Экспериментальное определение коэффициентов конвективной теплоотдачи в системе вентиляции с тепловым побуждением / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45. № 4. С. 133-141.
6. Семенов В.К., Беляков А.А. Обоснование гипотезы перехода ламинарного течения в турбулентное при смешанной конвекции жидкости в вертикальных каналах / Глобальная ядерная безопасность. 2017. №4 (25). С. 61-69
7. Семенов В.К. и др. Конвективное охлаждение обмоток мощных электрических трансформаторов [Текст] / В.К. Семенов, А.Ф. Горбунцов, Д.А. Горбунцов // Сб. "Исследования в области теоретических основ электротехники и инженерной электрофизики". Иваново: Изд. Ивановского энергоинститута, 1982. С. 113.
8. Гершуни, Г.З. и др. Устойчивость конвективных течений [Текст] / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий, А.А. Непомнящий. – М.: Наука, 1989.