

УДК 533.17

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОФИЛЯ СКОРОСТЕЙ В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КАНАЛА ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

В.И. Сиваков¹, И.В. Сиваков², Ю.В. Браславский¹

¹Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

²АО «СК Авлита», г. Севастополь

Определены газодинамические границы участков газового потока в цилиндрическом канале. Получена универсальная зависимость скорости движения газа (коэффициента скорости) вдоль оси канала в процессе расширения газа. Определен переменный показатель степени в формуле распределения скоростей.

Введение

При гидравлическом расчете газопроводов важнейшей задачей является определение поля скоростей и потерь давления газа в трубопроводе. Большинство авторов работ в этой области [1 - 3] подразделяют перемещение газа в трубопроводе значительной протяженности на движение на начальном, переходном и основном участках. Каждый из этих участков заканчивается определенной завершенностью деформации поля скоростей. Так, начальный участок заканчивается смыканием пограничного слоя и исчезновением ядра потока. Переходный участок вообще не рассматривается, а объединяется с основным участком, что является совершенно необоснованным, так как именно на переходном участке протекают основные процессы, определяющие структуру потока в газовом канале. Подобное объединение связано с отсутствием критерия, определяющего конец переходного и начало основного участка. Кроме того, максимальная скорость на оси канала выражается в абсолютных единицах (м/с), что не дает возможности оценить потерю кинетической энергии в центре канала. Поэтому возникает необходимость корректировки зависимости скорости движения газа в канале на переходном и основном участках.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является определение изменения профиля скоростей газового потока как в осевом, так и в поперечном сечении цилиндрического канала.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи: во-первых, определить изменение параметров газового потока вдоль оси цилиндрического канала значительной протяженности, во-вторых, определить изменение показателя степени в формуле распределения скоростей по радиусу канала.

Изменение параметров в газовом потоке на оси цилиндрического канала значительной протяженности

Рассмотрим установившееся движение газа в цилиндрическом канале значительной протяженности, которая обеспечивает формирование стабильного распределения скоростей в поперечном сечении канала.

Примем, что поле скоростей на входе в канал равномерное. По мере движения газа в канале происходит нарастание толщины пограничного слоя и уменьшение изоэнтропийного ядра потока. На некотором удалении от входа в канал происходит смыкание пограничного слоя и исчезновение ядра потока. Скорость на оси канала равна изоэнтропийной скорости, определяемой по формуле Сен-Венана. Коэффициент скорости на оси канала $j_{m1} = 1$, потеря кинетической энергии на оси канала $x_{c1} = 1 - j_{m1}^2 = 0$. На этом заканчивается формирование начального участка газового потока в трубопроводе. Дальнейшее движение газа по трубопроводу связано с уменьшением скорости (коэффициента скорости) на оси канала. Это обусловлено действием сил трения как от турбулентного перемешивания газа, так и от молекулярных сил вязкости. Причем действие этих сил на осевую скорость потока усиливается по мере движения газа по каналу, и при некотором значении длины переходного участка они достигают максимального значения и остаются постоянными при дальнейшем движении газа по каналу. Для количественной оценки действия этих сил на осевую скорость (коэффициент скорости) воспользуемся результатами работы по критическим режимам истечения газа через цилиндрические каналы различной протяженности [4]. В этой работе рассмотрим график изменения критического отношения давлений первого слоя e_1^* (на оси канала) в зависимости от критического отношения давлений пристенного слоя e_k^* (рис.). Эта зависимость получена из решения трансцендентного уравнения

$$(e_k^*)^{2e_k^*+1} = e_1^* \cdot (e_k^*)^{2e_1^*} \tag{1}$$

Из рисунка видно, что в первой группе каналов критическое отношение давлений первого слоя – величина постоянная и равная изоэнтропийному критическому отношению давлений $e_1^* = e_s^* = 0,528$ при изменении e_k^* от 0,528 до 0,28. Изменение этих параметров соответствует начальному участку газопровода значительной протяженности. Ко второй группе каналов относятся каналы, в которых критическое отношение давления первого слоя e_1^* изменяется от 0,528 до 0,4. При этом критическое отношение давлений пристенного слоя e_k^* изменяется в пределах 0,28...0,1. Изменение этих параметров соответствует переходному участку газопровода значительной протяженности. И наконец, к третьей группе каналов относятся каналы, в которых $e_1^* = 0,4$; $0,1 \geq e_k^* \geq 0$. Изменение этих параметров соответствует основному участку рассматриваемого газопровода. Подобная ссылка на критические параметры различных групп трубопроводов связана с тем, что критические параметры функционально связаны с политропным коэффициентом скорости j_m .

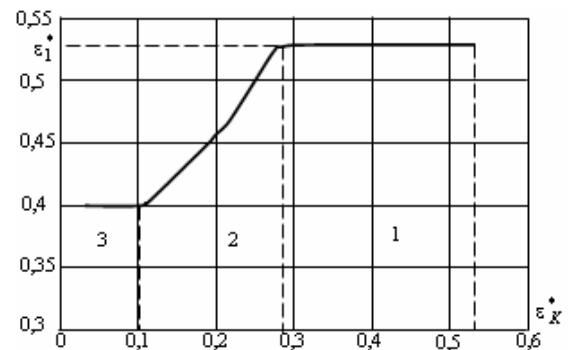


Рис. Изменение критического отношения давлений первого слоя газа в каналах от критического отношения давлений в пристенном слое: 1 – первая группа каналов; 2 – вторая группа каналов; 3 – третья группа каналов

Из результатов работ [4, 5] следует зависимость критических отношений давлений от их политропных коэффициентов скоростей:

$$e_s^* = (e_1^*)^{j_{m1}^2} = (e_k^*)^{j_{mk}^2} \tag{2}$$

Найдем значение политропных коэффициентов скоростей первого и пристенного слоев. Для этого прологарифмируем выражение (2):

$$j_{m1} = \left(\frac{\ln e_s^*}{\ln e_1^*} \right)^{0,5} \quad \text{и} \quad j_{mk} = \left(\frac{\ln e_s^*}{\ln e_k^*} \right)^{0,5}. \quad (3)$$

Эти коэффициенты являются постоянными величинами для данного слоя и при изменении относительного противодавления e_a^* от 1 до e_k^* остаются неизменными. Поэтому в газопроводе значительной протяженности реализуются все три участка газового потока, каждый со своими политропными коэффициентами скорости в соответствии с формулой (3).

Следует обратить внимание на то, что политропный коэффициент скорости $j_m = \frac{C_{sm}}{C_m}$ и коэффициент скорости $j_s = \frac{C_{sm}}{C_s}$ при изменении e_a от 1 до 0,7 и даже до $e_a = e_s^*$ незначительно отличаются друг от друга, но при $e_a = e_k^* j_m = \text{const}$, а $j_s = 1$.

Таким образом, на начальном участке критическое отношение давлений первого слоя для газов с показателем изоэтропы $k=1,4$ составляет $e_1^* = 0,528$ и $e_k^* = 0,528 \dots 0,28$, соответственно, коэффициенты скоростей – $j_{m1} = 1,0$ и $j_{mk} = 1,0 \dots 0,709$. В переходном участке $e_1^* = 0,528 \dots 0,4$, $e_k^* = 0,28 \dots 0,1$; $j_{m1} = 1,0 \dots 0,836$, $j_{mk} = 0,709 \dots 0,527$. В связи с тем, что переходный участок – самый деформируемый относительно поля скоростей, определим более подробно зависимость e_1^* и j_{m1} от e_k^* и j_{mk} . По результатам экспериментальных исследований (при необходимости более точного определения значений $e_1 = f(e_k)$) необходимо обратиться к формуле (1):

$$e_1^* = e_k^* + 0,25 \quad \text{для} \quad 0,28 \geq e_k^* \geq 0,21; \quad (4)$$

$$e_1^* = (e_s^*)^{0,83} \cdot (e_k^*)^{0,17} \quad \text{для} \quad 0,2 \geq e_k^* \geq 0,1. \quad (5)$$

Отсюда $j_{m1} = 1,33(j_{mk} - 0,634) + 0,9$ и $j_{m1} = \left(\frac{1}{0,83 + 0,17/j_{mk}^2} \right)^{0,5}$. Переходный участок заканчивается $e_1^* = 0,4, j_{m1} = 0,836, e_k^* = 0,1$ и $j_{mk} = 0,527$. Потери кинетической энергии вдоль канала только на переходном участке $x_{c1} = 1 - j_{m1}^2 = 1 - 0,836^2 = 0,3$. Основной участок начинается с $e_1^* = 0,4, j_{m1} = 0,836, e_k^* = 0,1, j_{mk} = 0,527$ и заканчивается при $e_1^* = 0,4, j_{m1} = 0,836, 0,1 \geq e_k^* > 0, 0,527 \geq j_{mk} > 0,4$.

Таким образом, определены границы всех трех участков при движении газового потока в цилиндрическом канале значительной протяженности.

Изменение показателя степени в формуле распределения скоростей по радиусу канала

В работах [4] и [5] было принято, что распределение скоростей (коэффициентов скоростей) по радиусу цилиндрического канала подчиняется зависимости

$$j_{mi} = j_{m1} \cdot \bar{y}_i^{a_k(1-\bar{y}_i)}, \quad (6)$$

где j_{mi}, j_{m1} – политропные коэффициенты скорости i -го и первого слоев, соответственно;

$\bar{y}_i = y/R$ – относительная координата i -го слоя газа;

a_k, a_i – показатели степени координат пристенного и i -го слоев газа, соответственно.

Это было обосновано тем, что на оси цилиндрического канала в газовом потоке касательные напряжения равны нулю, а значит, показатель степени при $\bar{y} = 1$ в формуле (6) также равняется нулю. В действительности ситуация несколько иная. В предыдущем разделе было показано, что на оси газового потока на переходном участке газового канала происходит непрерывное уменьшение политропного коэффициента скорости, а это является следствием изменения касательных напряжений на оси потока. Поэтому была разработана и усовершенствована формула показателя степени в зависимости от политропного коэффициента скорости на оси канала j_{m1} . Экспериментальным путем было получено, что показатель степени a_i при изменении координаты газовых слоев от $\bar{y} = 0,005$ до $\bar{y} = 0,5$ уменьшается плавно по линейному закону (7), а при изменении координаты от $\bar{y} = 0,5$ до $\bar{y} = 1,0$ – по закону (8), но с другим углом наклона:

$$a_{i(0,5)} = a_k(1 - 0,19\bar{y}); \quad (7)$$

$$a_{i(1)} = a_1 + 2(0,905 \cdot a_k - a_k)(1 - \bar{y}), \quad (8)$$

где

$$a_1 = \frac{\ln j_{m1}}{\ln 0,005} \quad \text{и} \quad a_k = \frac{\ln j_{mk} / j_{m1}}{\ln 0,005}. \quad (9)$$

Тогда формула изменения поля скоростей (коэффициентов скоростей) по радиусу канала будет состоять из двух частей. Первая часть

$$\frac{u_i}{u_{\max}} = \frac{j_{mi}}{j_{m1}} = (\bar{y}_i)^{a_{i(0,5)}}, \quad 0,5 \geq \bar{y} \geq 0,005. \quad (10)$$

Вторая часть формулы

$$\frac{u_i}{u_{\max}} = \frac{j_{mi}}{j_{m1}} = (\bar{y})^{a_{i(1)}}, \quad 1,0 \geq \bar{y} \geq 0,5. \quad (11)$$

Такое изменение показателя степени функции поля скоростей по радиусу канала можно объяснить следующим образом. Касательные напряжения, возникающие между стенкой канала и пристенным слоем, проникают внутрь газового потока канала до $\bar{y} = 0,5$ практически без изменения $a_5 = 0,905 \cdot a_k$, то есть показатель степени a_5 уменьшается всего на $0,095a_k$ от показателя пристенного слоя. Затем касательные напряжения уменьшаются гораздо быстрее, но на оси газового потока они не равны нулю, а определяются политропным коэффициентом скорости на оси канала по формуле (9). Максимального значения эти напряжения достигают на оси канала, на границе переходного и основного участков, и далее, на основном участке, они остаются неизменными. Для

підтвердження коректності формул (10) і (11) воспользуемся експериментальними даними роботи [3], сведем их в таблицу и сравним с расчетными значениями по рассматриваемым формулам. Для расчета поля скоростей возьмем трубопровод диаметром 350 мм. Исходные данные для такого расчета следующие: $j_{mk} = 0,458$; $j_{m1} = 0,836$; $a_k = 0,1135$; $a_1 = 0,0338$.

Т а б л и ц а

Изменение поля скоростей газового потока в трубопроводе диаметром 350 мм

\bar{y}	0,026	0,051	0,163	0,24	0,293	0,452	0,681	0,84	1,0
$u/u_{\max \text{ экп.}}$	0,658	0,706	0,814	0,859	0,881	0,927	0,977	0,989	1,0
$u/u_{\max \text{ расч.}}$	0,662	0,716	0,819	0,857	0,877	0,921	0,971	0,99	1,0

Из таблицы видно, что отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 1 %.

В работе [3] предложена формула, аналогичная формуле (6), но показатель степени $a_i = 0,9a_k$ и по радиусу канала остается постоянным. Функция с таким показателем степени первоначально завышает данные, а в конце – занижает их. Если обратиться к формулам (10) и (11) и подставить в них $\bar{y} = 0,5$, то получим $a_5 = 0,905 \cdot a_k$, то есть выбран показатель степени, имеющий среднее значение.

Формулы (10) и (11) используются на переходном и основном участках газового потока в цилиндрическом канале. Для их применения необходимо знать только политропный коэффициент скорости пристенного слоя j_{mk} газового потока. Необходимо отметить, что и другие параметры газового потока изменяются по радиусу канала в соответствии с формулами (10), (11), только со своими значениями a_k и a_1 .

Таким образом, определено изменение показателя степени в формуле распределения скоростей газового потока по радиусу канала.

Выводы

1. Впервые определены газодинамические границы участков газового потока в цилиндрическом канале. Показано, что переходный участок является определяющим в формировании поля скоростей канала.

2. Определено изменение максимальной скорости (коэффициента скорости) вдоль оси цилиндрического канала. Показано, что поток газа на оси канала на переходном участке теряет 30 % своей кинетической энергии.

3. Получена зависимость, определяющая изменение показателя степени в формуле, описывающей поле скоростей в канале, по радиусу канала.

ЗМІНА ПРОФІЛЮ ШВИДКОСТЕЙ В ГАЗОВОМУ ПОТОЦІ ЦИЛІНДРОВОГО КАНАЛУ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ

В.І. Сиваков, І.В. Сиваков, Ю.В. Браславський

Визначені газодинамічні межі ділянок газового потоку в циліндровому каналі. Отримана універсальна залежність швидкості руху газу (коефіцієнта швидкості) вздовж осі каналу в процесі розширення газу. Визначений змінний показник степені у формулі розподілу швидкостей.

VELOCITY PROFILE INSTABILITY in the GAS FLOW of the SIGNIFICANT LENGTHY CYLINDRICAL CHANNEL

V. Sivakov, I. Sivakov, Yu. Braslavsky

The gas-dynamic of the gas flow sections in the cylindrical channel were determined. The universal dependence of the gas movement velocity (velocity coefficient) along the canal axis during the gas expansion was obtained.

Список использованных источников

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1991. – 594 с.
2. *Альтшуль А.Д.* Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.
3. *Альтшуль А.Д.* Гидравлические потери на трение в трубопроводах / А.Д. Альтшуль. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 256 с.
4. *Сиваков В.И.* Определение критических параметров газового потока / В.И. Сиваков, И.В. Сиваков // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2012. – Вып. 1 (41). – С. 154 - 161.
5. *Сиваков В.И.* Определение расходов газа через канал при дозвуковых, смешанных и звуковых режимах течения газа / В.И. Сиваков, И.В. Сиваков, Ю.В. Браславский // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2012. – Вып. 4 (44). – С. 180 - 187.

Надійшла до редакції 12.02.2013 р.