

УДК 69.027.1

**Володин Ю.Г.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [yu.g.volodin@mail.ru](mailto:yu.g.volodin@mail.ru)

**Марфина О.П.** – кандидат технических наук

E-mail: [o\\_marfina@mail.ru](mailto:o_marfina@mail.ru)

**Цветкович М.С.** – аспирант

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Газодинамические характеристики отводящих стволов дымовых труб**

#### **Аннотация**

В статье приведены газодинамические характеристики отводящих стволов промышленных дымовых труб. Показано, что избыточные давления внутри ствола дымовой трубы по отношению к атмосферному давлению способствуют разрушению стенок трубы. Приводятся методы расчета газодинамических характеристик потоков дымовых газов, а также результаты расчетов по одномерной и трехмерной моделям течения.

**Ключевые слова:** дымовая труба, дымовые газы, отводящий ствол, газодинамические характеристики, математическое моделирование.

Современная дымовая труба, как правило, состоит из несущей конструкции-оболочки, газоотводящего ствола или футеровки и фундамента. Оболочка дымовой трубы должна обеспечивать высокую прочность сооружения к воздействию собственного его веса, к ветровой нагрузке, а также к сейсмическим и метеорологическим воздействиям. В качестве оболочек для дымовых труб современных теплоэлектростанций (ТЭС) исключительное применение получили конструкции из монолитного железобетона конической формы с изменяющейся по высоте толщиной стенки. Иногда верхнюю часть трубы на определенной высоте делают цилиндрической.



Рис. 1. Сквозные отверстия в стенке. Коррозия арматуры

Выбор конструкции дымовой трубы зависит от агрессивности дымовых газов, от их состава и точки росы, от мощности электростанции и ее типа. Агрессивность дымовых газов определяется содержанием агрессивных компонентов и влаги в топливе, разностью между температурой точки росы и температурой стенки газоотводящего ствола. Основными агрессивными компонентами дымовых газов считаются серные и сернистые ангидриды. При эксплуатации монолитных железобетонных труб с кирпичной футеровкой не редко наблюдаются ситуации, когда дымовые газы, проникнув через неплотности кладки и соединившись на бетонной оболочке со сконденсировавшимися водяными парами, образуют агрессивную жидкость, которая затем диффундирует в тело бетона, достигает металлической арматуры и таким образом, осуществляет разрушающее воздействие на все сооружение (рис. 1).

В работе [1] указывается, что до последнего времени причины проникновения газов наружу ствола были недостаточно изучены. Главной из них считалась диффузия газов за счет разности концентраций агрессивных компонентов внутри трубы и снаружи. Однако, исследования, проведенные рядом авторов [2] показали, что не менее существенно на процесс проникновения газов через стенку ствола дымовой трубы влияют газодинамические факторы. Доказано, что при наличии самотяги в нижней части трубы в определенных случаях (при увеличении нагрузки на трубу) на отдельных участках внутри ствола наблюдаются избыточные статические давления, которые стимулируют и ускоряют процесс фильтрации газов наружу.

Для выявления факта наличия избыточных статических давлений внутри ствола Л.А. Рихтером [3] предложен специальный критерий:

$$R = \frac{(\lambda + 8i)p_{до}}{g\Delta\rho D_0}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления ствола (для труб с кирпичной футеровкой  $\lambda$  обычно принимается равным 0,05);  $i$  – уклон образующей стенки ствола трубы;  $p_{до}$  – динамический напор в устье ствола, Па;  $D_0$  – диаметр устья, м;  $\Delta\rho$  – разница плотностей воздуха и дымовых газов, кг/м<sup>3</sup> (плотность газов принимается неизменной по высоте трубы);  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Считается, что если  $R$  меньше или равен 1, то вся труба находится под разрежением и проникновение агрессивных газов наружу невозможно. Если  $R$  больше 1, то на некоторых участках трубы возникает избыточное статическое давление на стенку, и это способствует усилению фильтрации агрессивных газов через футеровку. Проходя через швы, неплотности кладки и через поры кирпича, содержащиеся в газах водяные пары охлаждаются, конденсируются и, соединяясь с содержащимися в газах  $SO_2$  и  $SO_3$ , образуют серную кислоту, которая, как уже отмечалось, действует на железобетонную оболочку разрушающим образом.

Из сказанного следует, что для увеличения долговечности дымовых труб необходимо изучать и создавать условия, препятствующие возникновению и развитию указанного процесса.

Газоотводящие стволы дымовых труб образуются тем или иным сочетанием конфузоров, участков постоянного поперечного сечения и диффузоров, которые обычно составляют выходную часть газоотводящих стволов. Газодинамический расчет газоотводящих труб обычно сводится к определению давлений, действующих на стенку изнутри со стороны дымовых газов с целью определения участков, где разница между этими давлениями и атмосферным давлением приобретает положительный знак. При этом создаются условия более интенсивного проникновения агрессивных компонентов дымовых газов в железобетонную оболочку, вызывая соответствующие разрушения.

Существующие методы расчета газодинамических характеристик потоков дымовых газов строятся при следующих упрощающих допущениях:

- течение изотермическое;
- рабочая среда (дымовые газы) несжимаемая ( $\gamma = const$ );
- стенки канала непроницаемы и адиабатически изолированы;
- течение в трубе полностью сформировавшееся и стабилизированное, т.е. его характеристики по продольной координате не изменяются;
- температура дымовых газов постоянна по длине канала.

В газывыводящем тракте выделяется элементарный участок высотой  $dH$  с входным сечением  $f$  и выходным –  $(f+df)$ . Разность между статическим давлением  $p_0$  газов в устье ствола и барометрическим давлением  $B_0$  на той же отметке равна нулю ( $\Delta p_0 = 0$ ). В качестве линейного масштаба принимается диаметр устья  $D_0$ , а в качестве масштаба давления скоростной напор газов в устье  $p_{до} = \gamma w_0^2/2$  ( $\gamma$  и  $w_0$  – плотность газов и скорость их в устье).

Уравнение закона сохранения энергии для потока в стволе в случае необратимого адиабатического течения (с учетом трения газа о стенки ствола, но при отсутствии теплообмена с внешней средой и при отсутствии технической работы) записывается в виде:

$$p_1 + \left(\frac{\rho w_1^2}{2}\right) + \rho g H_1 \cong p_2 + \left(\frac{\rho w_2^2}{2}\right) + \rho g H_2 + \rho \Delta E_{т,м} \quad (2)$$

или

$$p_1 + \left(\frac{\rho w_1^2}{2}\right) - p_2 + \left(\frac{\rho w_2^2}{2}\right) + \rho g(H_2 - H_1) + \Delta p_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где  $p$  и  $w$  – статическое давление и среднерасходная скорость в сечениях ствола с координатами  $H_1$  и  $H_2$ .  $\Delta E_{\text{т.м}}$  – потери энергии потока на преодоление трения и местных сопротивлений;  $\Delta p_{\text{тр}}$  – потери давления на трение.

Разность статических давлений в стволе и барометрического давления в сечениях 1 и 2 получается равной:

$$\Delta p_1 = p_1 - B_1, \quad (4)$$

$$\Delta p_2 = p_2 - B_2, \quad (5)$$

при этом:

$$B_1 = B_2 + \rho_s g(H_2 - H_1), \quad (6)$$

где  $\rho_s$  – плотность окружающей среды. С учетом выражений (4) и (6), (3) преобразуются к виду:

$$\Delta p_1 + B_1 + \rho_s g \Delta H + \left(\frac{\rho w_1^2}{2}\right) = \Delta p_2 + B_2 + \left(\frac{\rho w_2^2}{2}\right) + \rho g(H_2 - H_1) + \Delta p_{\text{тр}}. \quad (7)$$

Приращение разности статических давлений на участке  $\Delta H = H_2 - H_1$  канала:

$$\Delta p_1 - \Delta p_2 = \left(\frac{\rho w_2^2}{2}\right) - \left(\frac{\rho w_1^2}{2}\right) - \Delta p g(H_2 - H_1) + \Delta p_{\text{тр}}, \quad (8)$$

где  $\Delta p = \rho_s - \rho$  – разность плотностей окружающего воздуха и газов в стволе.

Запишем (8) в дифференциальной форме:

$$\partial(\Delta p) = \rho w \partial w - \Delta p g \partial H + (\Delta p_{\text{тр}}), \quad (9)$$

а для  $\Delta p_{\text{тр}}$  принимают:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \frac{C_f \rho w^2}{2}, \quad (10)$$

где под  $C_f$  понимается локальный коэффициент трения, обусловленный тормозящим действием стенки канала, вязкостью протекающей среды и неравномерным распределением скорости в поперечном сечении потока, в общем случае переменный по длине газоотводящего ствола и существенно зависящий от режима течения, от распределения скоростей в сечениях канала, от шероховатости обтекаемой поверхности, от геометрии ствола и от целого ряда внешних возмущающих воздействий на поток.

Поделив обе части выражения (9) на  $\rho w^2/2$  и принимая во внимание очевидные соотношения и  $(w + \partial w)/w_0 = f_0/(f + \partial f)$ , с учетом выражения (10) получим:

$$\partial(\Delta \bar{p}) = \partial \Theta - \partial S. \quad (11)$$

Здесь  $\partial(\Delta \bar{p}) = \partial(\Delta p)/(\rho w_0^2/2)$  – относительное приращение разности статического и барометрического давлений;  $\partial \Theta$  – приращение форм-параметра на участке ствола  $\partial H$ , а  $\partial S$  – относительная самотяга на том же участке:

$$\partial \Theta = -\frac{f_0^2 \partial f}{f^2} + \frac{f_0^2}{f^2} \partial c, \quad (12)$$

$$\partial S = \Delta p g \partial H / (\rho w_0^2/2) = 2 \text{Ar}_0 (\partial H/D_0), \quad (13)$$

где  $\text{Ar}_0$  – критерий Архимеда:

$$\text{Ar}_0 = \Delta \rho \partial g D_0 / \rho w_0^2.$$

После интегрирования выражения (11) по высоте газоотводящего ствола получается:

$$\Delta \bar{p} = \Theta - S = \Theta - 2 \text{Ar}_0 \bar{H}, \quad (14)$$

где  $\bar{H} = H/D_0$  – относительная высота трубы.

Из формулы (14) видно, что форм-параметр характеризует распределение относительного перепада статического давления по высоте газоотводящего ствола при  $\Delta p = 0$ , которое зависит только от геометрических характеристик газоотводящего ствола и от состояния его внутренней поверхности.

Вопрос о режиме работы трубы решается в зависимости от величины и знака отношения:

$$\Phi = \frac{\Theta}{S} = \frac{\Theta}{2\bar{H}_k A r_0} \quad (15)$$

В работе [1] величина  $\Phi$  названа критерием газодинамического режима работы газоотводящего ствола, который представляет собой отношение суммы удельного приращения средней кинетической энергии потока и ее диссипации на участке между рассматриваемым сечением и устьем трубы к работе, совершаемой на этом участке единичным объемом газа под действием архимедовой силы. По мнению автора [1] значение  $j$ , определенного для устья газоотводящего ствола, дает ответ на вопрос: существует ли избыточное давление в верхней части ствола?

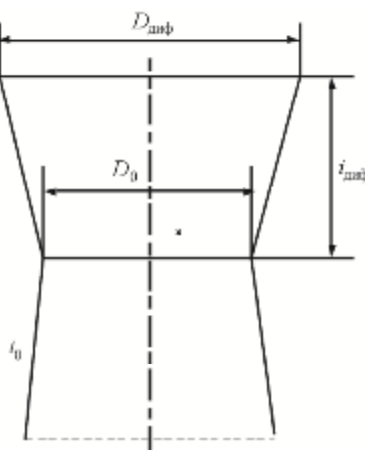


Рис. 2. Схема диффузора над устьем дымовой трубы:  
 $D_{\text{диф}}$  – диаметр диффузора,  $D_0$  – диаметр устья дымовой трубы,  
 $l_{\text{диф}}$  – высота диффузора,  $i_0$  –  $i$ -ая секция дымовой трубы

При необходимости для борьбы с избыточными статическими давлениями в дымовых трубах с газоотводящим стволом конической формы на выходе его рекомендуется устанавливать диффузор (рис. 2). В этом случае нулевая разность статических давлений имеет место на выходе из диффузора, а в узкой его части, примыкающей к стволу, образуется разрежение и на эту величину уменьшаются перепады между статическими давлениями газов в стволе и атмосферным давлением воздуха по высоте трубы.

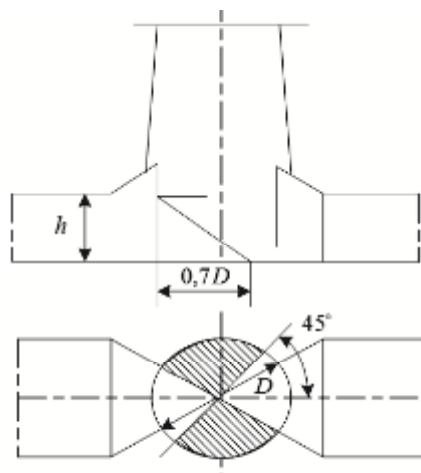


Рис. 3. Типовой цокль газоотводящего ствола конической формы  
с двухсторонним вводом газоходов:  
 $D$  – диаметр основания газоотводящего ствола,  $h$  – высота газохода

Важным элементом дымовой трубы является также цокольная часть, где происходит сопряжение ствола с газоходами. При выполнении цокольной части дымовых труб должны быть обеспечены минимальные гидравлические потери при вводе, отсутствие золовых отложений и созданы условия для их изготовления промышленными методами. При двухстороннем вводе газоходов в газоотводящие стволы конической формы рекомендуется устанавливать цоколь, представленный на рис. 3. В сечении устья  $\Theta = 0$  и  $S = 0$ . Выражение для  $\Phi$  приобретает форму, полученную Л.А. Рихтером в работе [4] другим путем:

$$R_0 = \lambda_y / 2 A r_0. \quad (16)$$

где  $\lambda_y$  – коэффициент сопротивления трения некоторого условного ствола, эквивалентного по своим геометрическим характеристикам участку, которым заканчивается рассматриваемый ствол. Из выражения (8) следует, что для определения газодинамических характеристик газоотводящих стволов, необходимо наряду с их геометрией знать коэффициенты потерь  $C_f$  при движениях потоков газов в стволах.

В отводящих стволах конфузорной формы с консольными выступами для опирания футеровки местные сопротивления, обусловленные дополнительным сужением сечений ствола в местах указанных выступов, а затем внезапным расширением потока после них, предлагается учитывать, принимая увеличенным коэффициент сопротивления трения. При расчете потерь на трение на участке отводящего ствола длиной  $l$  и диаметром  $D$  пользуются обычно известной формулой Дарси-Вейсбаха [5]:

$$\Delta p_{тр} = \lambda (\rho w^2 / 2) \cdot (l/D), \quad (17)$$

которая определяет потери энергии в цилиндрическом канале при стабилизированном течении жидкости через него.

Но стабилизированное течение, как известно, начинается на значительном расстоянии от входного сечения: с того места, где происходит смыкание динамического пограничного слоя и устанавливается развитый турбулентный профиль скорости. Это сечение обычно находится на расстоянии 30-50 диаметров от входа в канал (т.е. на расстоянии, соизмеримом с высотой типовой промышленной дымовой трубы). А в области начального участка картина течения (а, следовательно, и процессов тепломассообмена) существенно отличается от стабилизированного течения [5, 6, 7].

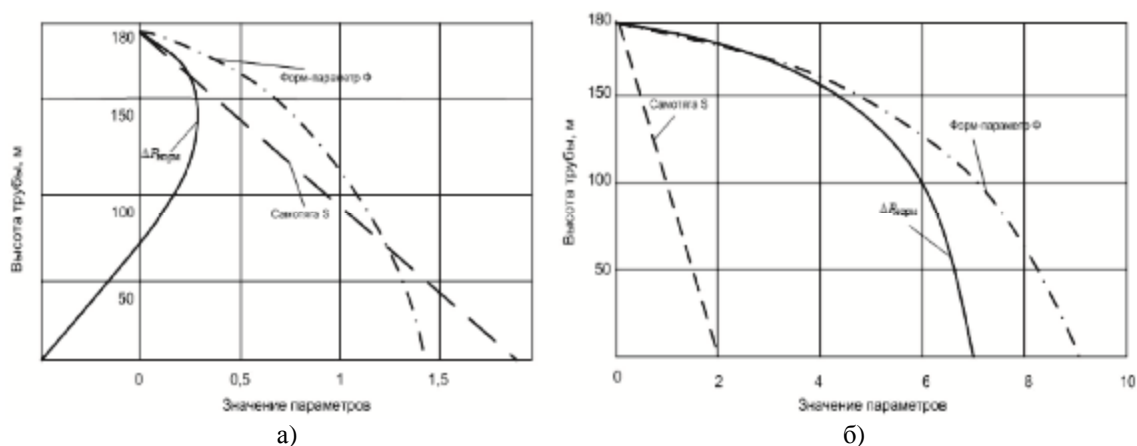


Рис. 4. Эпюры распределения параметров  $\overline{\Delta p}$ ,  $S$ ,  $\Phi$

для дымовой трубы высотой 180 метров рассчитанных:

а) по одномерной модели течения и б) по трехмерной модели течения.

$\overline{\Delta p} = \frac{\Delta p \cdot z}{\rho_n w_0^2}$  – перепад давления на стенку ствола со стороны дымовых газов

и барометрическим давлением в соответствующем поперечном его сечении;

$S = \frac{2g\Delta p_0 h}{\rho_n w_0^2}$ , – относительная самотяга;

$\Phi = \overline{\Delta p} + S$  – форм-параметр газоотводящего канала дымовой трубы

Для описания течения дымовых газов в рабочем пространстве отводящего ствола промышленной дымовой трубы предложена трехмерная математическая модель [8], основанная на осредненных по Фавру полных уравнениях Навье-Стокса, замкнутых  $k$ - $\varepsilon$  – моделью турбулентности с применением улучшенных пристеночных функций. Это обстоятельство позволило составить детальную физическую картину изучаемого процесса, установить наличие в значительной части внутреннего объема ствола интенсивных вторичных течений, вихревых зон, которые оказывают существенное влияние на кинематическую структуру всего потока, на характер распределения скоростей в различных его поперечных сечениях, а также на трение, теплоотдачу и массоперенос в пристеночных областях.

Вопрос о том, каковы величины давлений на стенку газоотводящего ствола дымовой трубы в различных его поперечных сечениях весьма важен при прогнозировании мест расположения наиболее уязвимых к коррозии зон его внутренней поверхности. Считается, что этот процесс особенно интенсивно протекает в тех случаях и в тех местах, где давление газов внутри ствола превышает атмосферное. Построение эпюр давлений и нахождение их характерных точек дает возможность более целенаправленно подходить к выбору геометрии газоотводящего канала при разработке проекта трубы, а также легко анализировать условия работы действующих дымовых труб при изменении режимов работы подключенного к ним оборудования. Результаты расчетов, полученные на базе одномерной модели течения дымовых газов, при построении которой был принят ряд упрощающих допущений, и которые в принципе (по причине одномерности) не способны адекватно учитывать особенности поведения потока на очень важном входном участке ствола, где течение имеет явно выраженный трехмерный характер, и от этого течения во многом зависят характеристики потока на других участках газоотводящего ствола дымовой трубы.

Главной причиной различия результатов расчетов, выполненных по одно и трехмерной моделям течений, являются закрутки в виде крупных вихрей и существенная трансформация кинематической структуры по высоте ствола. Вследствие вращательного движения потока дымовых газов в стволе появляются центробежные силы, которые создают дополнительное (к статическому) динамическое давление на его стенку. По мере продвижения потока дымовых газов к устью ствола вращательное движение ослабевает на некоторой высоте (в данном примере  $\approx 30$  метров) и далее постепенно вырождается. Направление движения потока становится полностью осевым с практически равномерным по сечению распределением скорости.

Трансформация кинематической структуры дымовых газов, происходящая по мере продвижения по отводящему стволу дымовой трубы, является причиной существенных неравномерностей в распределениях давлений, температуры, а также кинетической энергии турбулентности в рабочем пространстве ствола, ответственной за интенсивность протекания тепло- и массообменных процессов в трубе.

Из приведенных результатов расчетов следует вывод о том, что для обеспечения газодинамического режима в стволе, способствующего повышению коррозионной устойчивости его стенок, необходимо проведение мероприятий по предотвращению или максимальному ослаблению закрутки потоков дымовых газов в цокольной части дымовой трубы.

#### Список библиографических ссылок

1. Дужих Ф.П., Осоловский В.П., Ладыгичев М.Г. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы. – М.: Теплотехник, 2004. – 464 с.
2. Рихтер Л.А. Тепловые электрические станции и защита атмосферы. – М.: Энергия, 1975. – 312 с.
3. Рихтер Л.А., Елизаров Д.П., Лавыгин В.М. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 216 с.
4. Рихтер Л.А. Аэродинамические характеристики дымовых труб // Электрические станции, 1968, № 4. – С. 11-14.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / пер. с немец. – М.: Наука, 1969. – 712 с.

6. Володин Ю.Г., Марфина О.П. Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок. – СПб.: Изд. «Инфо-да», 2007. – 128 с.
7. Марфина О.П., Володин Ю.Г. Математическое моделирование нестационарного течения несжимаемого газа с теплообменом в осесимметричных каналах технологического оборудования // Известия КГАСУ, 2014, № 1 (27). – С. 155-163.
8. Володин Ю.Г., Марфина О.П., Цветкович М.С. Численное моделирование турбулентного течения газов в промышленной дымовой трубе // Приволжский научный вестник, 2014, № 6. – С. 33-35.

**Volodin Yu.G.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [yu.g.volodin@mail.ru](mailto:yu.g.volodin@mail.ru)

**Marfina O.P.** – candidate of technical sciences

**Tsvetkovich M.S.** – post-graduate student

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **The gas dynamic characteristics for the deferent trunks at the smoke pipes**

#### **Resume**

A modern smoke pipe is complex special engineering building of tower type, consisting of bearing reinforce-concrete shell and gas-outlet barrel. The choice of construction of flue depends on a number of technological parameters among that leading position is occupied by sulphuric corrosion. Development of this process is assisted by the presence of surplus static pressures into a barrel, that stimulate and accelerate the process of filtration of smoke gases outside. For the increase of longevity of flues it is necessary to study and create terms impedimental to the origin and development of the indicated process. In the article the methods of calculation of gas-dynamic descriptions of gas streams into the taking barrel of flue are driven. In addition, shown the results of calculations on unidimensional and three-dimensional to the models of flow of smoke gases to industrial smoke pipe.

**Keywords:** smoke pipe, smoke gases, deferent trunk, gas dynamics characteristics, mathematical modeling.

#### **Reference list**

1. Dugeh F.P., Osolovsky V.P., Ladegichev M.G. The industrial smoke and ventilation pipes. – M.: Heat technician, 2004. – 464 p.
2. Rihter L.A. Heat electrical stations and defence atmosphere. – M.: Energy, 1975. – 312 p.
3. Rihter L.A., Elizarov D.P., Lavegin V.M. Auxiliary equipment heat electrical stations. – M.: Energy atom publishing house, 1987. – 216 p.
4. Rihter L.A. The aerodynamic characteristics of the smoke pipe // Electrical stations 1968, № 4. – P. 11-14.
5. Schlichting H. Theory on the boundary layer. – M.: Science, 1969. – 712 p.
6. Volodin Yu.G., Marfina O.P. Mathematical modeling of starting regimes at the energy plants. – СПб.: Publishing house «Info-yes», 2007. – 128 p.
7. Marfina O.P., Volodin YU.G. Mathematical model the unsteady-state current non-compressible gas with heat transfer in the axle symmetric canals of technological equipment // Izvestiya KGASU, 2014, № 1 (27). – P. 155-163.
8. Volodin Yu.G., Marfina O.P., Tsvetkovich M.S. Numerical modeling turbulent current gases in the industrial smoke pipe // About Volga scientific bulletin, 2014, № 6. – P. 33-35.