

ДИФфуЗОРЫ ДЫМОВЫХ ТРУБ В ВИДЕ ОБОЛОЧКИ ВРАЩЕНИЯ С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ

Е.В. Субботин, В.М. Асташкин

SMOKE PIPE DIFFUSERS IN THE SHAPE OF THE ROLLER SHELL WITH A CURVILINEAR CONE

Y.V. Subbotin, V.M. Astashkin

Показано, что общие закономерности влияния формы образующей диффузора при его работе в сети могут быть применены и при оценке работы диффузоров на выходе из дымовой трубы. Проведены численные исследования внутренней и наружной аэродинамики диффузоров при их различной относительной длине и форме образующей. Рассмотрены материалоемкость и технологичность изготовления стеклопластиковых криволинейных диффузоров, отмечается их преимущество перед металлическими диффузорами.

Ключевые слова: дымовые трубы, диффузоры, стеклопластик.

It is shown that the general rules of the diffuser generatrix shape impact in its line work can be also applied in the process of estimating diffusers' activity at the smoke pipe outlet. Numerical studies of inner and outer aerodynamics of diffusers of different relative length and generatrix shape were carried out. Materials consumption and production effectiveness of glass-fibre-reinforced plastic curvilinear diffusers are considered and their advantage over metal diffuser is shown.

Keywords: smoke pipes, diffusers, glass-fiber material.

Аэродинамические характеристики дымовых труб существенно сказываются как на общем сопротивлении газоотводящего тракта, так и на степени агрессивного воздействия дымовых газов на конструкции труб. Установка на выходе из них диффузоров позволяет существенно снизить, а в некоторых случаях полностью ликвидировать избыточное давление газов в трубах и газоходах, фильтрацию газов через негерметичную футеровку, уменьшить перепад полных давлений по газовому тракту и снизить расход энергии на транспортировку газов. Традиционно диффузоры для труб выполнялись из стали. Учитывая технологию изготовления и монтажа диффузоров, преимущество отдавалось простым диффузорам - коническим с прямолинейной образующей. Их геометрическую форму можно характеризовать двумя параметрами: относительной длиной диффузора L_d/d и углом раскрытия α . Из-за больших диаметров труб длину диффузоров приходится ограничивать по соображениям конструктивного и монтажного характера. Требование минимальной длины особенно важно для диффузоров, устанавливаемых на существующих дымовых трубах, рассчитанных на определенную ветровую нагрузку, которая с появлением диффузоров увеличивается. Поэтому для дымовых труб характерно применение сравнительно коротких диффузоров $L_d/d \leq 2$,

но снижение их относительной длины L_d/d ведет к увеличению сопротивления диффузора.

Применение стеклопластика позволяет пересмотреть подходы к проектированию диффузоров для дымовых труб, так как стеклопластик обеспечивает коррозионную стойкость и позволяет изготавливать более эффективные с точки зрения аэродинамики формы. Здесь, прежде всего, идет речь о диффузорах с криволинейной образующей [1].

В работах [2-4] показано, что применение криволинейной образующей диффузора в трубопроводных сетях при больших углах раскрытия дает существенное преимущество по сравнению с прямолинейной образующей. При этом практически отсутствуют данные по криволинейным диффузорам, установленным на выходе из труб в свободное пространство, в том числе при режимах, характерных для дымовых труб.

Для оценки эффективности стеклопластиковых криволинейных диффузоров необходимо рассмотреть их внутреннюю и наружную аэродинамику, материалоемкость и технологичность изготовления.

Аэродинамика диффузоров

Известно [2-4], что при течении жидкости или газа по каналу с внезапным расширением поперечного сечения имеют место потери напора на удар, которые могут быть определены как

$$\Delta h_{\text{уд}} = \frac{\rho}{2} (W_1 - W_2)^2 = \frac{\rho W_1^2}{2} \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right)^2,$$

где ρ - плотность жидкости (газа), W , F_1 и W_2 , F_2 - скорость и площадь сечения на входе и на выходе соответственно.

Максимальные потери получаются при выходе потока из канала в свободное пространство (в атмосферу), когда $F_2 = \infty$ (или $W_2 = 0$). В этом случае весь скоростной напор, имеющийся в выходном сечении, теряется и коэффициент сопротивления с выходом будет равен

$$\zeta_{\text{уд}} = \frac{\Delta h_{\text{уд}}}{0,5\rho W_1^2} = 1,0.$$

Потери удара можно значительно уменьшить, если переход от узкого сечения к широкому осуществить плавно, с помощью диффузора (расширяющегося канала).

Изучение диффузоров началось в XVIII веке, интенсивно велось на протяжении всего XX века и не прекращается в настоящее время. Вследствие того, что в диффузоре с ростом площади поперечного сечения средняя скорость потока при увеличении угла расширения а падает, общий коэффициент сопротивления диффузора становится до определенных пределов а меньшим, чем для такой же длины участка трубы постоянного сечения с площадью, равной начальной площади сечения диффузора. Но дальнейшее увеличение этого угла повышает коэффициент сопротивления, так как пограничный слой отрывается от стенок и усиливается турбулентное перемешивание потока.

Было экспериментально доказано, что весьма удачным с точки зрения уменьшения потерь при расширении потока является применение таких диффузоров, в которых соблюдалось бы постоянство градиента давлений ($dp/dx = \text{const}$) или скоростей ($dW/dx = \text{const}$) вдоль канала.

Проведенные И.Е. Идельчиком [3, 4] испытания в сети криволинейных диффузоров ($dp/dx = \text{const}$) показали, что в пределах углов расширения 25-90° уменьшение потерь в них по сравнению с прямолинейными доходит до 40 %.

Испытаний диффузоров с криволинейной образующей, установленных на выходе в свободное пространство ($F_2/F_1 = \infty$) И.Е. Идельчиком не проводилось. Однако, учитывая общность рассмотренных физических явлений и закономерностей в аэродинамике диффузоров, можно предположить, что установка криволинейных диффузоров на выходе в свободное пространство даст результаты, подобные полученным на криволинейных диффузорах, за которыми установлены дополнительные участки трубопроводов.

Действительно, по Идельчику [3, 4] потери энергии в прямолинейном диффузоре, установленном на выходе потока в свободное пространство,

во, складываются из потерь в самом диффузоре (те же потери, что и в диффузоре, установленном в сети) и потери кинетической энергии при выходе потока в свободное пространство.

Истинная кинетическая энергия струи на выходе из диффузора вследствие неравномерности профиля скоростей в этом месте должна быть больше кинетической энергии, взятой по средней скорости, следовательно, и потери напора в диффузоре со свободным выходом должны быть больше, чем потери, взятые для случая равномерного распределения скоростей на выходе.

Если пренебречь влиянием указанной неравномерности, то выражение для коэффициента сопротивления диффузора круглого сечения со свободным выходом можно будет написать в виде

$$\zeta_{\text{полн}} = \zeta_{\text{д}} + \zeta_{\text{вых}}.$$

Изменение параметров диффузора по разному влияет на слагаемые этой формулы и может быть решена задача по минимизации этой суммы, то есть минимизации $\zeta_{\text{полн}}$.

Для учета неравномерностей профиля скоростей на выходе Идельчиком была предложена поправка σ в диапазоне углов расширения 5-20°, с учетом которой

$$\zeta_{(\text{полн})\text{ист}} = (1 + \sigma)\zeta_{\text{полн}}.$$

Величина поправки σ берется в диапазоне от 0 до 0,5 в зависимости от длины диффузора (чем короче диффузор, тем больше поправка). Экстраполировать ее на углы расширения больше 20° не представляется возможным.

Учитывая, что величины кинетической энергии на выходе струи из диффузоров с прямолинейной и криволинейной образующей с учетом рассмотренных особенностей величины идентичные, а потери в самом диффузоре аналогичны потерям в диффузоре, установленном в сети, допущение об эффективности использования криволинейных диффузоров на выходе из дымовых труб можно считать обоснованным. Для более точной оценки данной гипотезы необходимо проведение экспериментальных и численных исследований.

Существующая методика аэродинамического расчета газоотводящего тракта тепловых агрегатов [5] предусматривает учет в перепаде полных давлений сопротивления дымовой трубы. Сопротивление дымовой трубы при этом складывается из сопротивления трению $\Delta P_{\text{тр}}$ и сопротивления с выходной скоростью $\Delta P_{\text{вых}}$. Коэффициент сопротивления с выходом газов из трубы согласно существующим требованиям [5] принимается равным $\zeta_{\text{вых}} = 1$, как для свободного выхода потока из сети с равномерным полем скоростей на выходе. Однако анализ показывает, что в реальных условиях эксплуатации не только поле скоростей на выходе нельзя назвать равномерным, но и сам выход газов из трубы далеко не является свободным, прежде всего из-за влияния ветра.

Практически все существующие до последнего времени исследования в области аэродинамики газоотводящего тракта в части определения коэффициентов местного сопротивления, базировались только на результатах экспериментальных данных. Сейчас появилась возможность расширить область применения вычислительной гидродинамики на задачи, связанные с аэродинамикой газоотводящих трактов.

В проведенных нами численных исследованиях использовался вычислительный комплекс «FlowVision».

Для оценки влияния ветра на коэффициент сопротивления диффузора, установленного в верхней части дымовой трубы, в качестве расчетной модели был принят конический диффузор с диаметром на входе $d_1 = 1$ м, диаметром на выходе $d_2 = 1,56$ м, длиной $L_d = 2$ м, $L_d/d_1 = 2$, угол раскрытия $\alpha = 16^\circ$. Перед входом в диффузор смоделирован цилиндрический участок длиной 2 м. Диффузор помещен в призматическую область с размерами в плане 4x4 м, высотой 6 м, имитирующую часть атмосферы. Модель - «несжимаемая жидкость (газ)», плотность воздуха и газов приняты равными 1. Расчетная область была разбита на 14 524 расчетные ячейки. Скорость газов на входе в трубу принята равной 7 м/с, скорость ветра 0...20 м/с. В результате расчетов получены значения статических давлений на входе в диффузор (без учета самотяги) p_{c+0} . Полный коэффициент сопротивления диффузора (коэффициент сопротивления с выходом трубы с диффузором) равен $\zeta_{\text{полн}} = 1 - p_{c+0}/p_{d0}$, где p_{d0} - динамический напор на входе в диффузор. Результаты расчетов приведены на рис. 1.

Коэффициент сопротивления диффузора при скорости ветра 0 м/с (свободный выход струи) получился равным $\zeta = 0,24$ и хорошо согласуется с данными ($\zeta = 0,27$), полученными И.Е. Идельчиком [3, 4], что позволяет судить о достоверности модели.

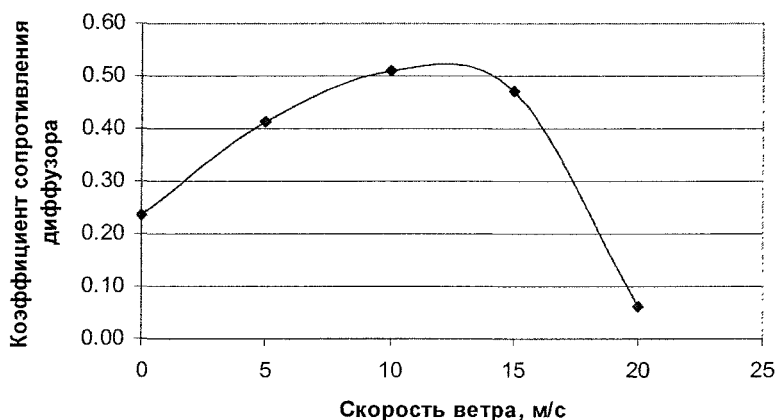


Рис. 1. Изменение коэффициента сопротивления диффузора на выходе из дымовой трубы при $L_d / d_1 = 2$, угле раскрытия $\alpha = 16^\circ$ и скорости газов на входе 7 м/с

Из графика на рис. 1 видно, что вначале при росте скорости ветра от 0 до 14 м/с коэффициент сопротивления диффузора увеличивается, что очевидно связано со сжатием выходящей струи ветром. Затем с дальнейшим повышением скорости ветра коэффициент сопротивления диффузора снижается, очевидно, за счет преобладающего проявления эжекторного эффекта и при скорости ветра выше 19 м/с становится даже меньше коэффициента сопротивления при выходе без ветра. Подобные явления, очевидно, будут наблюдаться и для труб без диффузора. Таким образом, воздействие ветра, которое для верхней части дымовых труб имеется практически всегда, влияет на коэффициент сопротивления с выходом из дымовой трубы, и этот фактор нужно учитывать.

Далее проведена оценка полного коэффициента сопротивления диффузора на выходе из трубы при коротких диффузорах с прямолинейной и криволинейной образующей поверхности. Для этого рассмотрена модель, отличающаяся от предыдущей тем, что за цилиндрическим участком следует короткий диффузор длиной L , диаметр на выходе тот же $d_2 = 1,56$ м. Результаты расчета и сравнения даны на рис. 2. Как видно из приведенных графиков, в диффузорах с криволинейной образующей при больших раскрытиях сопротивление меньше, чем с прямолинейной образующей и могут применяться гораздо большие по величине углы раскрытия и соответственно более короткие диффузоры. Преимущество криволинейных диффузоров именно в этой области.

Расчетная структура потоков газа в диффузоре и выхода газов из него с учетом обтекания ветром приведена на рис. 3 и 4, из которых видно преимущество криволинейных диффузоров по меньшему отрыву потока от стенок, так и по меньшему самоокутыванию.

Материалоемкость диффузоров

Из анализа рис. 2 следует, что при одинаково малом сопротивлении (0,3) диффузор с криволи-

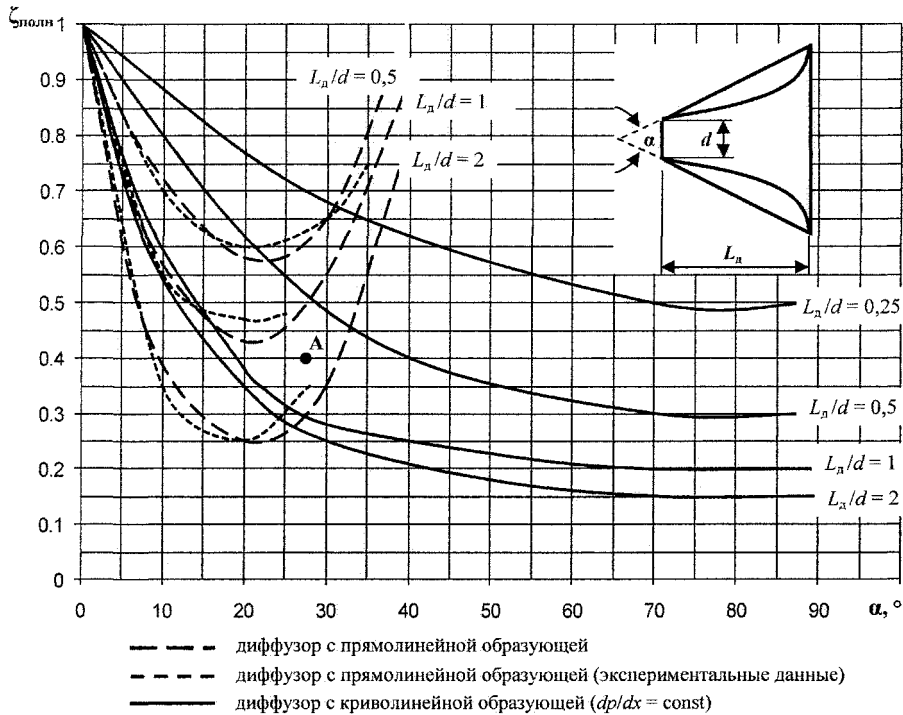


Рис. 2. Значения коэффициентов сопротивления $\zeta_{полн}$ диффузоров круглого сечения с прямолинейной и криволинейной образующей, установленных на выходе из трубы, в зависимости от угла раскрытия (α) и относительной длины (L_n/d)

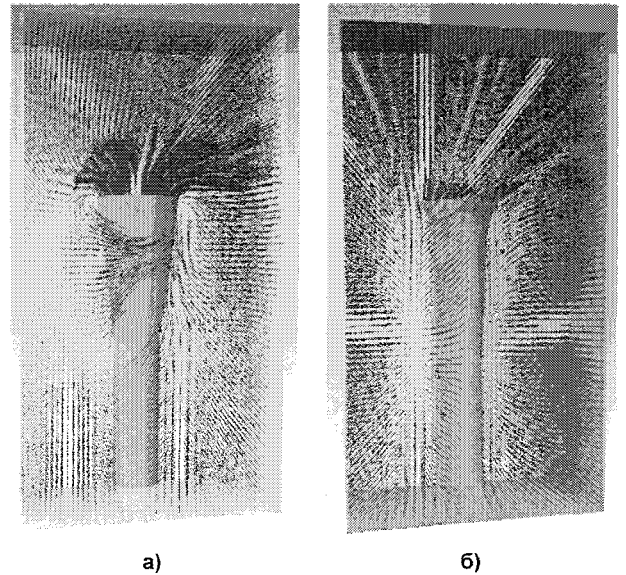
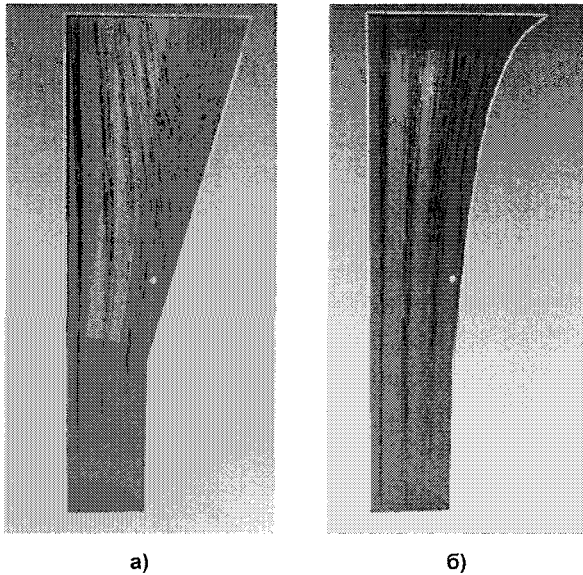


Рис. 3. Структура потока в диффузорах: а – в традиционном диффузоре с значительным углом раскрытия происходит отрыв потока от стенок, что ведет к повышению аэродинамического сопротивления; б – в криволинейном диффузоре отрыв потока не происходит

Рис. 4. Выход газов из диффузора с учетом обтекания ветром: а – в традиционном диффузоре происходит самоукатывание газами; б – в криволинейном диффузоре самоукатывание не происходит

нейной образующей в 2 раза короче диффузора с прямолинейной образующей, значит и площадь его будет примерно в 2 раза меньше. При этом надо иметь в виду, в первом случае мы имеем оболочку двоякой кривизны, устойчивость которой может быть обеспечена при меньшей толщине, чем у оболочки одинарной кривизны в случае диффузора с прямолинейной образующей. В итоге затраты материала на диффузор с криволинейной образующей

более чем в 2 раза ниже, чем на диффузор такого же сопротивления с прямолинейной образующей. Эти соображения справедливы для случая реконструкции дымовых труб, заключающейся в установке диффузора, то есть когда не ставится задача достижения определенной отметки устья трубы.

Для случая нового строительства эффект будет меньше, так как для достижения отметки устья добавляется прямой участок трубы с диаметром

как на входе диффузора. По предварительным оценкам, снижение материалоемкости верхней части трубы за счет применения диффузора с криволинейной образующей, по сравнению с прямой, составит в этом случае 20...30 %.

О технологичности изготовления диффузоров с криволинейной образующей

При изготовлении диффузоров из металла образование оболочки двойкой кривизны в случае диффузора с криволинейной образующей значительно усложняет технологию вальцовки, поэтому из металла делают диффузоры с прямолинейной образующей. Стеклопластик позволяет без дополнительных затрат изготавливать элементы любой формы, так как она зависит только от формы оправки и технология изготовления стеклопластиковых криволинейных и прямолинейных диффузоров практически одинакова. При габаритных для перевозки размерах для изготовления может быть применена намотка, предпочтительнее одновременное изготовление двух диффузоров, сочлененных по большему диаметру, с последующей их разрезкой. негабаритные диффузоры собираются из габаритных элементов, чаще всего на продольных фланцах. Технология формирования стеклопластиковых элементов в этом случае (контактным способом или напылением) при криволинейной и прямолинейной форме образующей ничем не отличается.

Реализация материалов исследований

Материалы проведенных нами исследований использованы при проектировании, изготовлении и возведении ряда дымовых труб со стеклопластиковыми диффузорами, предпочтение по техническим и экономическим показателям отдано диффузорам с криволинейной образующей.

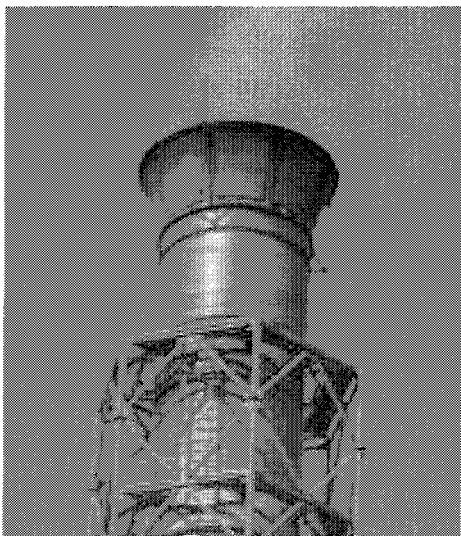


Рис. 5. Верхняя часть дымовой трубы диаметром 3,6 м со стеклопластиковым диффузором на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

На рис. 5 показана верхняя часть дымовой трубы со стеклопластиковым диффузором в виде оболочки вращения с криволинейной образующей на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» ($d_1 = 3,6$ м, ($d_2 = 4,6$ м, $\alpha = 26^\circ$, $L/d = 0,7$). Соответствующая этим параметрам характеристика диффузора показана точкой «А» на рис. 2.

Выводы

1. Проведенный анализ показал, что общие закономерности влияния формы образующей диффузора при его работе в сети могут быть применены и при оценке работы диффузоров на выходе из дымовой трубы.

2. Численные исследования показали влияние ветра на коэффициент сопротивления с выходом дымовой трубы, что особенно актуально для труб с диффузором.

3. Результаты расчета и сравнения показали, что для дымовых труб в диффузорах с криволинейной образующей при больших раскрытиях сопротивление меньше, чем с прямолинейной образующей, соответственно и длина диффузора в первом случае может быть меньше без ухудшения аэродинамических характеристик.

4. Численный анализ спектра потоков показал, что при криволинейной образующей диффузора в отличие от прямолинейной не происходит отрыва внутреннего потока от стенок и меньше проявляется эффект самоокутывания дымовыми газами верхней части трубы.

5. Стеклопластиковые диффузоры с криволинейной образующей поверхности по техническим и экономическим показателям лучше, чем с прямолинейной образующей.

Литература

1. Свидетельство на ПМ 29322 РФ, МПК-7 E 04 H 12/28. Ствол дымовой трубы / В.М. Асташкин, О.Е. Михайлова, В.А. Пазушан, Е.В. Субботин; опубл. 10.05.2003, Бюлл. № 13.
2. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1974. — 711 с.
3. Идельчик, И.Е. Аэродинамика потока и потери напора в диффузоре // Промышленная аэродинамика. — М.: МАП, 1947. — Вып. 3. — С. 132-209.
4. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.
5. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. — 3-е изд. — Л.: Энергия, 1977. — 256 с.

Поступила в редакцию 18.яня 2010 г.