

ГЛАВА 2

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЫМОВЫХ ТРУБ

Выбор материала и конструкции дымовой трубы следует осуществлять на основании технико-экономического обоснования с учетом режима эксплуатации, специального оборудования для возведения, а также архитектурно-композиционных соображений.

Проектирование дымовых труб, как и всякое проектирование, включает в себя несколько этапов.

На первом этапе формируются компоновочное решение всего газоотводящего тракта, включающего дымовую трубу, и конструктивная схема самой трубы. При компоновке учитывают, что расстояние между соседними дымовыми трубами должно быть не менее пяти средних наружных диаметров трубы.

В местах соединения газоходов с трубой надлежит предусматривать осадочные швы или компенсаторы. В случае ввода в трубу в одном горизонтальном сечении двух газоходов их следует располагать с противоположных сторон на одной оси, при вводе трех газоходов - под углом 120° один к другому, при этом суммарная площадь ослабления в одном горизонтальном сечении не должна превышать 40 % общей площади сечения железобетонного ствола трубы или стакана фундамента, 30 % ствола кирпичной трубы и 20 % несущего ствола стальной трубы.

При вводах в дымовую трубу нескольких газоходов и одновременной их работе необходимо предусматривать в нижней части трубы или в стакане фундамента разделительные стенки или направляющие патрубки, исключая взаимное влияние потоков газа, а также уменьшающие аэродинамическое сопротивление.

Для защиты несущего ствола дымовой трубы от температурного и агрессивного воздействия отводимых газов в необходимых случаях применяется футеровка и тепловая изоляция ствола. В зависимости от температуры и агрессивности отводимых газов футеровку следует выполнять из шамотного, кислотоупорного или глиняного обыкновенного кирпича, специального бетона, керамики, стали, а также пластмасс.

Футеровка из кирпича предусматривается звеньями, опирающимися на консольные выступы в стволе. Высота звеньев должна быть не более 25 м при толщине в один кирпич и не более 12,5 м при толщине в $1/2$ кирпича. В зоне проемов для газоходов толщину футеровки следует увеличивать до $1\frac{1}{2}$ - 2 кирпичей. При применении специальной фасонной шпунтовой керамики толщина футеровки может быть уменьшена. Примыкание нижнего звена к вышележащему необходимо проектировать с учетом роста футеровки (в результате процессов сульфатации материала швов кладки) и температурного расширения материала футеровки как по высоте, так и по диаметру.

В нижней части дымовой трубы, фундаменте или подводящих газоходах следует предусматривать лазы для осмотра трубы, а в необходимых случаях - устройства, обеспечивающие отвод конденсата.

С наружной стороны трубы должны предусматриваться площадки и лестницы, а для кирпичных труб - скобы. Лестницы или скобы следует устанавливать на расстоянии 2,5 м от поверхности земли. Площадки, лестницы и скобы должны иметь ограждения.

2.1. Основные факторы и исходные данные для разработки проекта

Проектирование промышленных дымовых труб, особенно больших высот, — сложная инженерная задача. Как всякое проектирование, оно включает в себя расчет и конструирование. Поскольку для составления расчетной схемы нужна часть исходных параметров конструкции, стадии расчета предшествует предварительное эскизное конструирование с составлением конструктивной схемы сооружения.

При выборе конструктивных решений дымовых труб необходимо обеспечить: их долговечность и надежность, а также бесперебойную работу обслуживаемых ими агрегатов; воз-

возможность проведения технического обслуживания трубы, включая контроль за ее состоянием; возможность выполнения текущих и профилактических ремонтов; возможность применения промышленных методов их возведения; оптимальные технико-экономические показатели (минимальную стоимость, экономию материалов, незначительные эксплуатационные затраты и т.п.).

Проектирование определяется большим числом параметров и сопровождается массой математических расчетов, выполнить которые без применения серьезной вычислительной техники практически не представляется возможным. Для расчета используют 2 типа программ:

1. Программы, реализующие нормативные методы расчета, то есть расчет ведется по приводимым в нормативных документах формулам и алгоритмам. Эти программы, как и нормативные методы расчета, содержат много допущений, особенно в вопросах напряженно – деформированного состояния. Этот тип программ в большинстве не сертифицирован, разрабатывается проектными организациями и применяется ими для облегчения расчетов.

2. Сертифицированные расчетные комплексы общего назначения, как правило основанные на методе конечных элементов, позволяющие с меньшими допущениями и более детально исследовать аэродинамику, тепловые поля и напряженно – деформированное состояние дымовой трубы и ее элементов. Для дальнейшего применения полученных результатов требуются дополнительные расчеты. Некоторые расчетные комплексы имеют дополнительные блоки с программами нормативных методов, например комплексы «ЛИРА».

Изложить все вопросы применения этих программ не представляется возможным, поэтому материал, приведенный в данной книге, дает лишь общее представление о методах расчета промышленных труб для понимания работы труб и их элементов.

Проектирование дымовой трубы начинают с рассмотрения основных параметров ее службы, заданных конструктивных особенностей, характеристик района расположения и данных инженерной геологии.

В задании на проектирование должны быть указаны:

- режимы эксплуатации трубы, включающие объем и характеристики дымовых газов (температура, состав, влажность, температура точки росы), а также возможные колебания нагрузки;
- количество, сечение и отметки подводящих газоходов;
- сейсмичность района строительства;
- ветровые нагрузки;
- материалы по инженерной геологии и гидрогеологии;
- данные по строительной климатологии района строительства.

Комплекс расчетов по проектированию дымовых труб различных конструкций из разных строительных материалов можно условно разделить на следующие стадии:

1. По общим методикам определяют высоту трубы и диаметр выходного отверстия, а также после составления конструктивных схем трубы выполняют предварительные аэродинамические расчеты.

2. Из технико-экономического сравнения вариантов выбирают тип трубы по конструктивной схеме и виду основного материала, определяют основные геометрические параметры трубы.

3. Уточняют аэродинамические и производят тепловые расчеты.

4. Производят силовой расчет, в составе которого рассчитывают ствол трубы на нагрузки и воздействия, а также рассчитывают фундамент.

2.2. Расчет высоты и выходного диаметра трубы

Диаметры выходных отверстий и высоту дымовых труб следует определять на основании аэродинамических, теплотехнических и санитарно-гигиенических расчетов.

Диаметры надлежит принимать по следующему унифицированному ряду: 1,2; 1,5; 1,8; 2,1; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6 м и далее через 0,6 м.

Минимальные диаметры труб следует назначать с учетом оборудования, применяемого при возведении труб, но не менее 1,2 м - для кирпичных труб (в свету по футеровке) и 3,6 м - для монолитных железобетонных. Диаметры труб стальных и из конструкционных пластмасс допускается уменьшать до 0,4 м при их высоте до 45 м.

Высоту дымовых труб следует назначать по следующему унифицированному ряду: 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 м и далее через 30 м и принимать для кирпичных и армокирпичных труб не более 120 м, это же ограничение касается и большинства стальных свободно стоящих (бескаркасных) труб.

Минимальная высота дымовой трубы определяется из двух условий: обеспечения рассеивания вредных веществ, а для труб только с естественной тягой – и из условия ее обеспечения. Выполнение этих условий связано еще и с выходным диаметром дымового канала (устье трубы), так как он определяет скорость дымовых газов на выходе из трубы. Эта скорость влияет в первом случае на высоту подъема факела и, следовательно, на рассеивание вредных веществ и самоокутывание оголовка, во втором случае влияет на тягу через сопротивление трению и сопротивление с выходной скоростью, которые возрастают с квадратом скорости.

Необходимо подчеркнуть, что высота дымовой трубы по методике расчета рассеивания вредных примесей должна выбираться после того, как будут определены и учтены все возможности по уменьшению количества выбросов вредных веществ в атмосферу.

2.2.1. Расчет выходного диаметра и высоты трубы для обеспечения естественной тяги

Естественная тяга обуславливается разностью плотности воздуха и продуктов сгорания (дымовых газов) в трубе. Плотность воздуха зависит от его температуры и влажности, поэтому летом тяга дымовой трубы снижается, а зимой возрастает.

При больших диаметрах трубы может наблюдаться обратный поток атмосферного воздуха, так называемое задувание в трубу. Чтобы свести к минимуму негативные последствия этого явления, скорость дымовых газов на выходе из трубы стараются принимать не ниже 5...8 м/с.

Требуемая площадь выходного отверстия трубы при естественной тяге определяют как отношение выходящего объема газов к его скорости, откуда его диаметр

$$d_0 = 1,13\sqrt{V_1/W_0},$$

где V_1 – объем дымовых газов, м³/с; W_0 – скорость дымовых газов, м/с.

Необходимую высоту дымовой трубы определяют по формуле

$$H = \frac{1,2\Delta h_{\Pi} + (1,1h_{до} + \Delta h_{тр}) \frac{\rho_0}{12,93} \frac{760}{h_{бар}}}{(\rho_B - \rho_0) \frac{273}{273 + t_2} \frac{h_{бар}}{760}},$$

где Δh_{Π} — перепад полных давлений газового тракта, не включающих в себя при естественной тяге самотягу трубы и ее сопротивление, Па; 1,2 — коэффициент запаса по тяге; $h_{до}$ — динамическое давление на выходе из дымовой трубы (потери давления с выходом), Па; $\Delta h_{тр}$ — потери давления на сопротивление трения в трубе, Па; ρ_B — плотность наружного воздуха, кг/м³; ρ_0 — приведенная плотность дымовых газов при нормальных условиях, кг/м³; 273 — термодинамическая температура, °С; 1,1 — коэффициент местного сопро-

тивления выхода; $1,293$ — плотность сухого воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 ; $h_{\text{бар}}$ — среднее барометрическое давление, мм рт. ст.; t_2 — средняя температура дымовых газов в трубе, $^{\circ}\text{C}$.

Динамическое давление $p = 0,5\rho W^2$, а плотность наружного воздуха

$$\rho_B = 352/(273 + t_B),$$

где t_B — средняя температура наружного воздуха в самых жаркий летний месяц, $^{\circ}\text{C}$.

$\Delta h_{\text{тр}}$ - потери давления на сопротивление трения в трубе Рассмотрены ниже, в разделе 2.3.1 (Особенности внутренней аэродинамики).

2.2.2. Расчет высоты трубы при принудительной тяге

При искусственной (принудительной) тяге высоту дымовой трубы определяют исходя из условий обеспечения допустимых концентраций вредных веществ в атмосфере.

Скорость дымовых газов в трубах с принудительной тягой обычно высока - до 30...40 м/с. В этих условиях столб дымовых газов поднимается зачастую значительно выше самой трубы. Следовательно, на высоту выбрасываемого столба газов существенное влияние начинает оказывать общее состояние атмосферы.

Важнейшим фактором, определяющим рассеивание в атмосфере дымовых газов, содержащих вредные примеси, является атмосферная турбулентность. Эта характеристика атмосферы — результат двух процессов: нагревания атмосферы и поверхности земли, в связи с чем образуются естественные конвективные потоки, и механической турбулентности вследствие взаимодействия ветрового потока с подстилающей поверхностью.

Нагревающийся у поверхности земли воздух в результате уменьшения плотности поднимается вверх, а более холодный и плотный воздух опускается к поверхности земли. Но бывают случаи, когда температура воздуха с высотой возрастает (инверсия температуры), и вертикально поднимающийся столб дымовых газов на определенной высоте оказывается холоднее окружающих масс и его движение затухает.

Если условия инверсии дополняются малыми скоростями ветра, то приземные концентрации вредных веществ увеличиваются как за счет ограничения их активного перемешивания по вертикали, так и за счет уменьшения в этих условиях эффективной высоты подъема факела.

Таким образом, можно считать, что для дымовой трубы большой высоты наиболее неблагоприятно сочетание приподнятой мощной инверсии, начинающейся на высоте выброса, и малой скорости ветра в приземном слое атмосферы, а для невысокой трубы — сочетание приземной инверсии и приземного штиля.

Концентрации вредных примесей определяют, решая уравнение турбулентной диффузии применительно к тому или иному состоянию атмосферы.

Однако в реальной атмосфере характер изменения турбулентной диффузии и скорости ветра значительно сложнее, поэтому для практических расчетов рассеивания в атмосфере вредных примесей, содержащихся в выбросах предприятий, используют методику, основанную на неблагоприятных метеорологических условиях, когда скорость ветра достигает опасного значения и

имеет место интенсивный вертикальный турбулентный обмен в атмосфере.

Опасная скорость ветра — это такая скорость, при которой для заданного состояния атмосферы концентрация вредных примесей на уровне дыхания людей достигает максимальной величины.

2.3. Основы аэродинамического расчета дымовых труб

2.3.1. Особенности внутренней аэродинамики

После определения высоты дымовой трубы и ее выходного диаметра следующей задачей является выбор оптимальной геометрии ее дымового канала посредством выполнения аэродинамического расчета. Аэродинамические режимы работы труб отражаются на выборе их конструкции, что связано прежде всего с распределением статических давлений по высоте дымового канала. Аэродинамические характеристики дымовых труб существенно сказываются как на общем сопротивлении газоотводящего тракта, так и на степени агрессивного воздействия дымовых газов на конструкции труб.

Для определения аэродинамических характеристик газоотводящего ствола необходимо определить сопротивление движению потока газов и потери его напора. Сопротивление дымовой трубы складывается из сопротивления трению $\Delta P_{тр}$ и сопротивления с выходной скоростью $\Delta P_{вых}$.

Простейшая форма газоотводящего ствола — ствол постоянного сечения (цилиндрический).

Сужающиеся газоотводящие стволы — это чаще всего осесимметричные последовательно расположенные конфузоры с дискретно уменьшающимся уклоном.

За конфузорными участками может следовать, обычно последним, диффузор или участок постоянного сечения.

В конфузорном газоотводящем стволе с консольными выступами для опирания футеровки местные сопротивления, обусловленные дополнительным сужением сечения ствола в местах этих выступов, а затем внезапным расширением потока после них, можно учесть, принимая увеличенным коэффициент сопротивления трения ствола.

При расчете потерь на трение на участке газоотводящего ствола длиной l и диаметром D используют известную гидравлическую формулу, которая определяет потери при стабилизированном течении, хотя хорошее совпадение формулы с опытными данными наблюдается при удалении рассматриваемого участка на 20-30 калибров от входного сечения, где произошло смыкание пограничного слоя и установился типичный турбулентный профиль скорости:

$$\Delta p_{тр} = \lambda \frac{\rho \omega^2 l}{2 D}$$

Сопротивление трения конической трубы. Па, рассчитывают по формуле

$$\Delta h_{тр} = \frac{\lambda}{8i} (h_{до} - h_{д}),$$

где i — уклон дымовой трубы; $h_{до}$ — динамическое давление на выходе, Па; $h_{д}$ — динамическое давление в нижнем сечении трубы. Па.

Расчет величины статического давления, $\Delta h_{ст}$ Па, по высоте трубы выполняют по формуле

$$\Delta h_{CT} = h_{\partial 0} + \Delta h_{TP} - h_{\partial}^r - (\rho_B - \rho_r)S,$$

где Δh_{TP} — сопротивление трения на рассмотренном участке, вычисляемое по разным формулам в зависимости от цилиндрической или конической конфигурации ствола, Па; h_{∂}^r — динамическое давление газа, Па; $h_{\partial 0}$ — динамическое давление в устье трубы; S — расстояние расчетного сечения от верхней отметки трубы, м.

Статическое давление внутри ствола трубы изменяется по высоте, и зачастую на промежуточной отметке происходит смена его знака.

Точка, лежащая на отметке, где происходит смена знака давления в стволе дымовой трубы, т.е. инверсия давления, называется инверсионной точкой, а сечение (диаметр) и отметка, где она находится, — инверсионным сечением (диаметром) и инверсионной отметкой.

Для характеристики статического давления в дымовом канале трубы используют критерий Рихтера, вычисляемый по формуле

$$R = \frac{(\lambda + 8 \cdot i) \cdot p_{\partial 0}}{g \cdot \Delta \rho \cdot D_0}, \quad (1)$$

где λ — коэффициент сопротивления трения, равный для футерованных труб 0,05, а для нефутерованных 0,015—0,03; i — уклон образующей ствола трубы; $p_{\partial 0}$ — динамический напор в устье ствола, Па; D_0 — диаметр устья, м; $\Delta \rho$ — разница плотностей воздуха и дымовых газов, кг/м³ (плотность газов принимается неизменной по высоте трубы); $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения;

$p_{\partial 0}$ — динамический напор в устье ствола: $p_{\partial 0} = 0,5 \rho W^2$,

где: ρ — плотность газа, W — скорость газового потока

При $R \leq 1$ в дымовой трубе по всей высоте будет соблюдаться разрежение. При $R > 1$ в стволе трубы возникает избыточное давление.

В такой оценке избыточного давления дымовых газов предполагается, что в любой наружной точке поверхности ствола действует давление воздуха, равное атмосферному на данной отметке. В то же время известно (см. рис. 1), что при обтекании цилиндрического тела ветровым потоком на его боковых и подветренной сторонах возникают зоны разрежения (отрицательного статического давления). Величина разрежения в зависимости от скорости ветра может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен Паскалей, поэтому стенка ствола дымовой трубы, особенно в ее верхней части, оказывается в условиях, когда разрежение воздуха снаружи ствола больше, чем разрежение газов внутри. Стремление среды по градиенту давления в зону с меньшим разрежением приводит к фильтрации газов через футеровку к наружной оболочке.

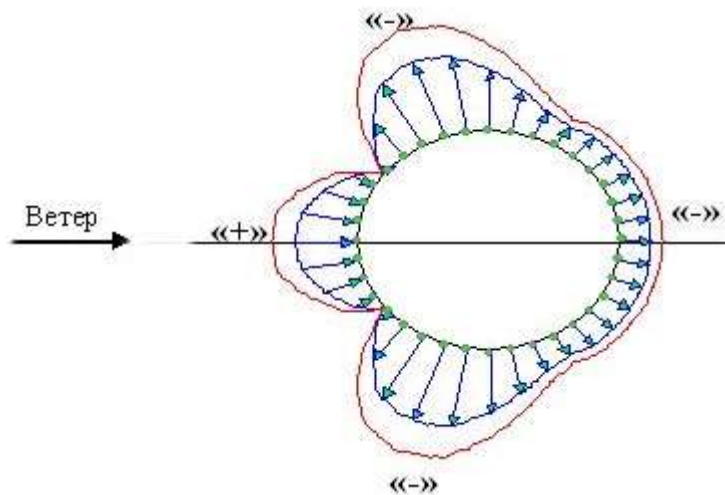


Рис. 1. Схема распределения статических давлений при обтекании трубы ветровым потоком («+» - избыточное статическое давление, «-» - разрежение)

Анализ характера повреждений дымовых труб показывает, что, как правило, разрушение начинается в верхней трети ствола, наименее нагруженной силовыми воздействиями. При этом имеются все признаки фильтрации конденсата дымовых газов через стенку трубы (намокание, отслоение защитного слоя и коррозия арматуры, лещадка), однако оценка по критерию Рихтера часто свидетельствует о том, что избыточного давления при этом в трубе не возникает.

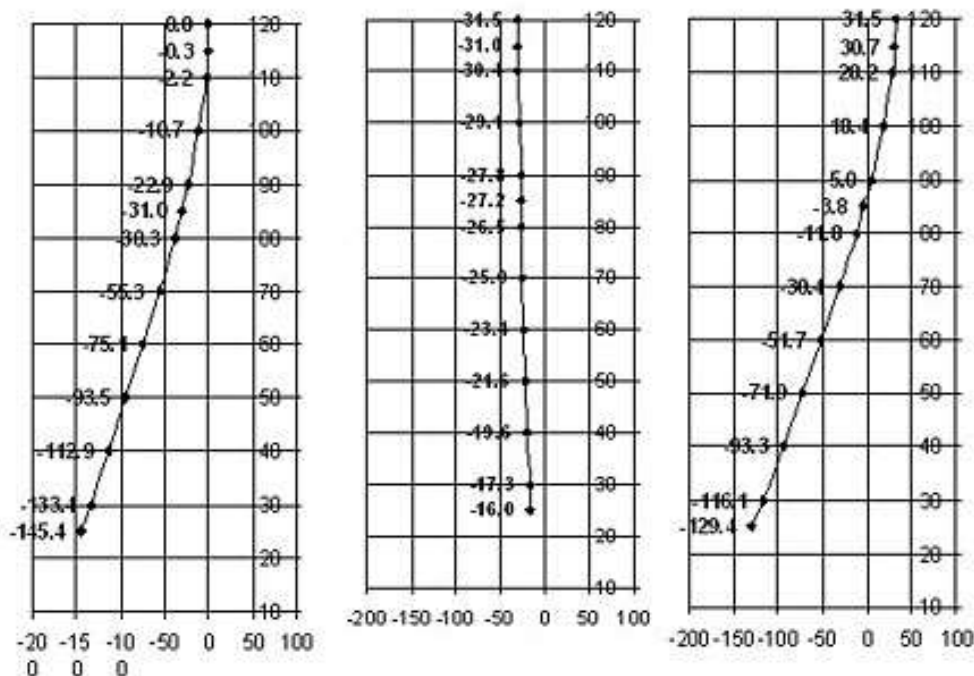
Это явление наиболее ярко проявляется в районах с большими скоростями ветра и значительным преобладанием одного направления в розе ветров. В этом случае повреждения ствола однозначно локализуются в зонах, соответствующих максимальному разрежению, создаваемому ветром.

Так, например, при обследовании ЗАО «ЭЦ ВИС» железобетонной дымовой трубы $H=120$ м $D_0=4,8$ м цементного завода «Пролетарий» ОАО «Новоросцемент» (г. Новороссийск) выявлены значительные повреждения несущего ствола преимущественно в юго-западном - северо-западном секторах. При этом климат Новороссийска характеризуется сильными преимущественно северо-восточными ветрами. Средняя скорость ветра - 5 м/с, в холодное время года северо-восточные ветра периодически усиливаются до 40 м/с (ветра «бора»). Максимальный расход отводимых через трубу технологических газов $225 \text{ м}^3/\text{с}$, температура газов $140-170 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате аэродинамического расчета была получена эпюра статических давлений в трубе (см. рис. 2а). Из эпюры видно, что труба по всей высоте работает при разрежении газов в стволе. Затем, исходя из средней скорости ветра в данном районе (5 м/с) и изменения ветрового давления по высоте рассчитаны значения максимального ветрового разрежения при обтекании ствола трубы ветром (рис. 2б). Разница величин разрежений внутри и снаружи ствола трубы показана на рис. 2в. Из рисунка видно, что даже при небольших скоростях ветра с отм. 90,0 м до отм. 120,0 м в зонах ветрового разрежения имеется положительный градиент статических давлений, создающий условия для фильтрации газов в этих зонах через футеровку и стенку ствола наружу. В период наиболее сильных ветров градиент давлений многократно возрастает, а процесс фильтрации ускоряется, вызывая коррозию арматуры и бетона, увеличивая температурно-влажностные напряжения и провоцируя разрушение несущей оболочки ствола [].

а)

б)

в)



Статическое давление, Па

Рис. 2. Этюры статических давлений (Па) в железобетонной дымовой трубе $H=120$ м $D_0=4,8$ м цементного завода «Пролетарий» ОАО «Новоросцемент»

- а) - статическое давление внутри ствола дымовой трубы (общепринятая методика);
- б) - статическое давление снаружи ствола в зонах максимального ветрового разрежения;
- в) - разность (градиент) статических давлений дымовых газов и наружного воздуха при действии ветра.

Таким образом, фактически положительный градиент статических давлений внутри и снаружи ствола возникает у всех дымовых труб при их эксплуатации, так как разрежение газов к устью трубы снижается до нуля, а ветровое разрежение с боковых и подветренной сторон трубы достигает максимума. Этот факт является дополнительным объяснением того, что практически все дымовые трубы подвержены более интенсивному разрушению в верхней части. Необходимо учитывать указанные особенности при проектировании и оценке причин разрушения дымовых труб и разработке решений по их ремонту и реконструкции.

Оптимальный профиль ствола дымовой трубы выбирают на основании технико-экономического анализа.

Пример аэродинамического расчета газоотводящего тракта дан в [норм.метод]

2.3.2. Диффузоры и их аэродинамика

Установка на выходе из дымовых труб диффузоров позволяет существенно снизить, а в некоторых случаях полностью ликвидировать избыточное давление газов в трубах и газоходах, фильтрацию газов через негазоплотную футеровку, уменьшить перепад полных давлений по газовому тракту и снизить расход энергии на транспортировку газов.

Все газоотводящие стволы с негазоплотными футеровками желательно выполнять с диффузорами на выходе. Это связано с тем, что в таких трубах разрежение в их верхней части настолько невелико, что происходит заметная диффузия паров и дымовых газов через футеровку, тем более если имеется избыточное давление. Диффузоры обеспечивают значительное разрежение именно вверху трубы, в результате чего диффузионные процессы замедляются.

Особенности аэродинамического расчета труб с диффузором заключаются в определении и учете коэффициента сопротивления диффузора.

При течении жидкости или газа по каналу с внезапным расширением поперечного сечения, что мы имеем на выходе из трубы, 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_1 , 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 при скорости потока W потери на удар составят $\Delta h_{\text{уд}} = \frac{\rho}{2} (W)^2$ и коэффициент сопротивления с выходом будет $\zeta_{\text{уд}} = 1$, что и принято в нормативном методе расчета [].

Потери удара можно значительно уменьшить, если переход от узкого сечения к широкому осуществить плавно, с помощью диффузора (расширяющегося канала), поскольку при этом снижаются скорости потока при выходе в открытое пространство. Кроме того, из-за снижения скорости уменьшаются потери на трение. В результате снижается статическое давление в дымовых трубах, что позволяет существенно увеличить их нагрузку без появления избыточного давления (рис.2.3).

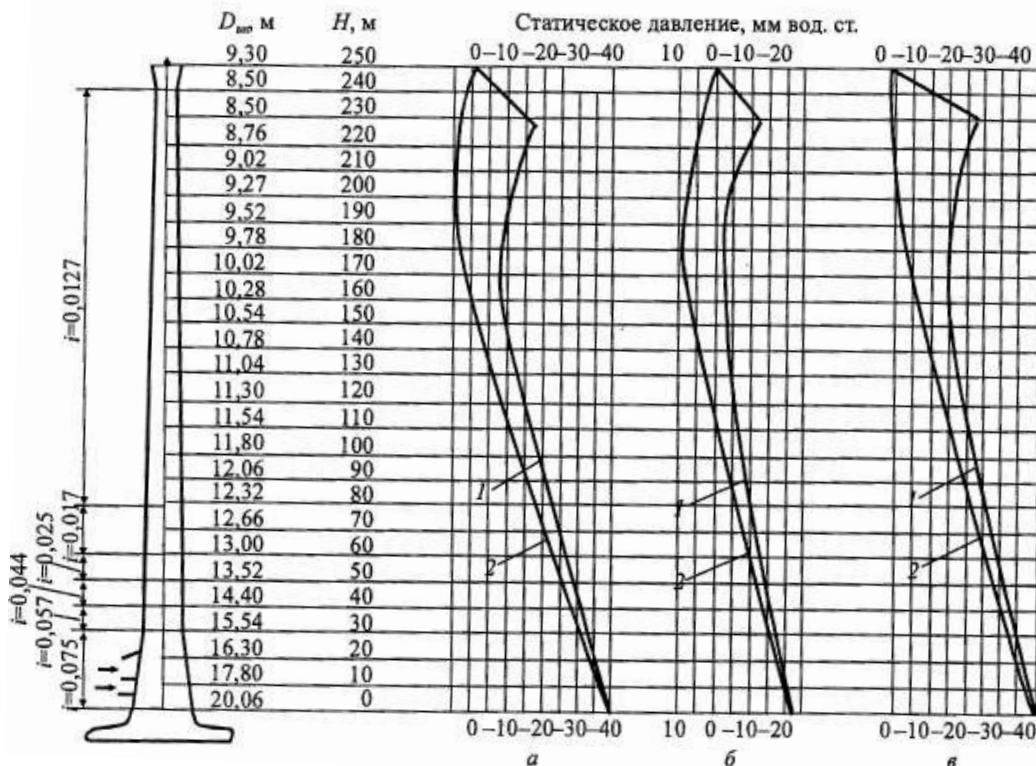


Рис. 3. Эпюры распределения статического давления дымовых газов при различных режимах работы трубы без диффузора и при установке на ней диффузора. Температура газов +150 °С: *а* — при скорости газов 25-28 м/с; *б* — при скорости газов 29-32 м/с; *в* — при скорости газов 20 м/с; *1* — с диффузором; *2* — без диффузора

Все газоотводящие стволы с негазоплотными футеровками следует выполнять с диффузорами на выходе. Это связано с тем, что и при избыточном давлении в таких трубах разрежение в их верхней части настолько невелико,

что происходит заметная диффузия паров и дымовых газов через футеровку. Диффузоры обеспечивают значительное разрежение именно вверху трубы в результате чего диффузионные процессы замедляются.

При установке диффузоров следует учитывать их коэффициенты сопротивления.

Коэффициент сопротивления собственно диффузора без учета потерь с выходной скоростью, определяют по формуле

$$\zeta_d = 1 + h_{ст} / h_d - \varepsilon,$$

где $h_{ст}$ и h_d — соответственно статистическое и динамическое давление во входном сечении диффузоров, Па; ε — квадрат отношения площадей входного и выходного диаметров диффузора, $\varepsilon = (F_1/F_2)^2$

$$\zeta_{вых} = h_{п} / h_d,$$

где $h_{п}$ — полное давление во входном сечении диффузора, Па.

Исследования показали, что при наличии диффузора высота подъема дымового факела может быть меньше, чем при коническом или цилиндрическом стволе, вследствие ухудшения структуры потока на выходе. Но при отношении высоты диффузора к его входному диаметру $L/D_i \geq 1,2$ подъем факелов от цилиндрического ствола и диффузора одинаков, так как течение происходит без отрыва потока факела.

Полный коэффициент сопротивления $\zeta_{полн}$ диффузора круглого сечения со свободным выходом в пространство складывается из сопротивления диффузора трению ζ_d и сопротивления с выходной скоростью $\zeta_{вых}$

$$\zeta_{полн} = \zeta_d + \zeta_{вых}$$

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

Из-за больших диаметров труб длину диффузоров приходится ограничивать по соображения 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 с относительной длиной $L/d \leq 2$, но ее снижение ведет к увеличению сопротивления диффузора (L - длина диффузора, d - диаметр его входного сечения).

Наиболее часто диффузоры для труб выполнялись из стали. Учитывая технологию изготовления и монтажа диффузоров, преимущество отдавалось простым диффузорам – коническим с прямолинейной образующей.

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]. Диффузо-

ры такого профиля широко используются в трубопроводных сетях и их применение при больших углах раскрытия дает существенное преимущество по сравнению с прямолинейной образующей. Было экспериментально показано, 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. Испытания в сети криволинейных диффузоров ($dp/dx = \text{const}$) показали, что в пределах углов расширения $25-90^\circ$ уменьшение потерь в них по сравнению с прямолинейными доходит до 40 %. Учитывая общность 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.

Нормативный метод расчета [] не позволяет учесть форму образующей диффузора, в частности ее криволинейную форму.

Результаты расчетной оценки (с использованием вычислительного комплекса «FlowVision») полного коэффициента сопротивления диффузора на выходе из трубы при коротких диффузорах с прямолинейной и криволинейной образующей поверхности даны на рис. []. 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.

Из анализа рис. 2 следует, что при одинаково малом сопротивлении (0,3) диффузор с криволинейной 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 двойной 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 будут по крайней мере 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 прямолинейной, составит в этом случае 20...30 %.

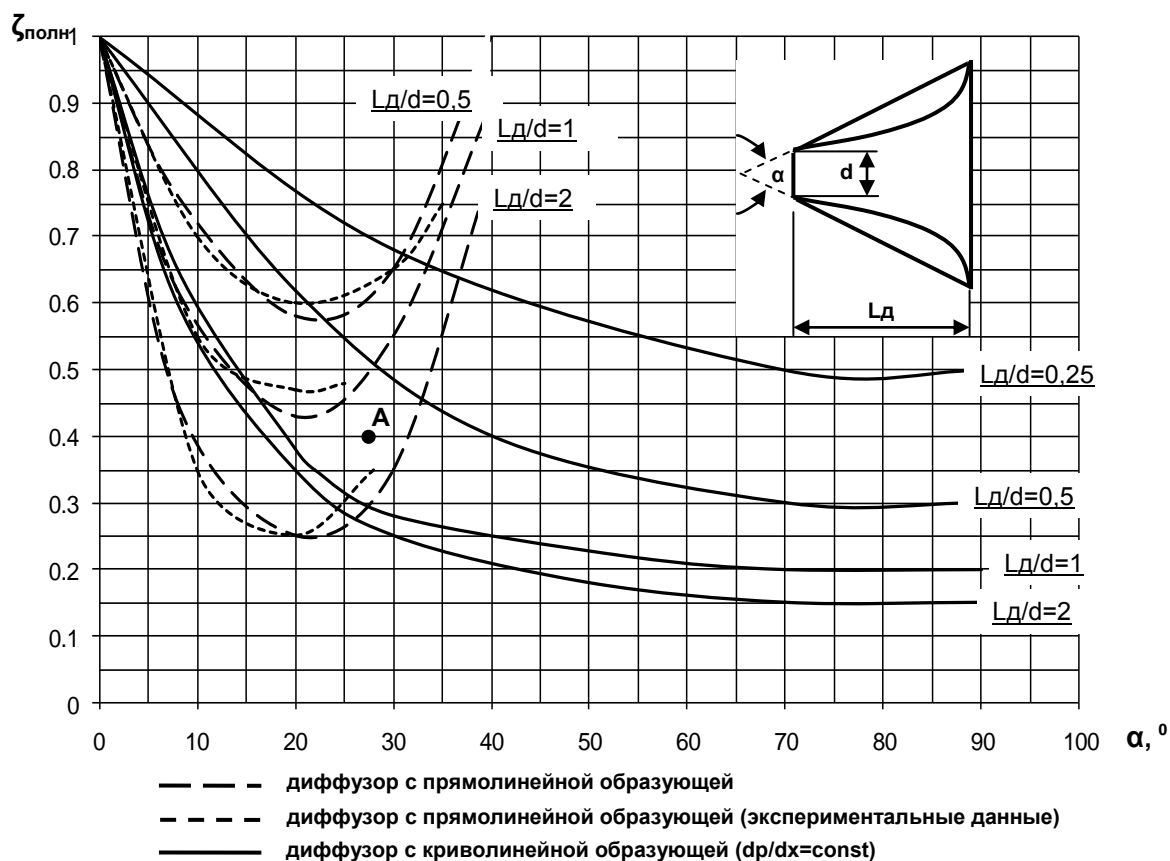


Рис. 2. Значения коэффициентов сопротивления $\zeta_{\text{полн}}$ диффузоров круглого сечения с прямолинейной и криволинейной образующей, установленных на выходе из трубы, в зависимости от угла раскрытия (α) и относительной длины (L_d/d)

Исследования показали, что при наличии диффузора высота подъема дымового факела может быть меньше, чем при коническом или цилиндрическом стволе, вследствие ухудшения структуры потока на выходе.

В ряде случаев вместо применения диффузора в целях исключения появления в дымовой трубе избыточного статического давления целесообразно ее верхнюю часть выполнять цилиндрической формы.

В тех случаях, когда исключить появление избыточного статического давления в дымовой трубе путем выбора оптимальной геометрии не представляется возможным, следует принимать конструктивные решения, нейтрализующие негативные последствия этого явления, например применение газоплотной футеровки или выполнение ствола трубы из газоплотного материала.

2.3.3. Самоокутывание газоотводящих труб

Термин "самоокутывание" газоотводящих труб отражает явление окутывания (обволакивания) верхней наружной части дымовой трубы газами, выходящими из трубы в атмосферу. Из наблюдений за работающими газоотводящими трубами установлено, что при определенных условиях часть дымовых газов, выходящих из трубы, опускается вдоль ее наружной поверхности с подветренной стороны, вызывая окутывание трубы. Смешиваясь с атмосферным воздухом и атмосферными осадками, соприкасаясь с наружной поверхностью трубы, опускающиеся дымовые газы охлаждаются. Содержащиеся в них водяные пары конденсируются, и образующаяся жидкая агрессивная среда вызывает разрушение окутываемого участка трубы. Корродируют и разрушаются также внешние металлоконструкции (светофорные площадки, лестницы, элементы грозозащиты), попадающие в зону самоокутывания. Ремонт оголовков газоотводящих труб может потребовать остановки подключенного к трубам оборудования и связан со сложными и дорогостоящими высотными работами.

Для разработки конструктивных решений по защите газоотводящих труб от разрушений при самоокутывании проведены необходимые аэродинамические исследования.

Верхняя часть ствола газоотводящих труб выполняется либо цилиндрической, либо конической с малым углом конусности. Поэтому обтекание ветром верхней части газоотводящей трубы можно рассматривать как поперечное обтекание цилиндра равномерным потоком.

При плоском безвихревом обтекании круглого цилиндра идеальной жидкостью скорости на его поверхности распределяются по закону синуса

$$u = 2u_{\infty} \sin \varphi \quad (1.1)$$

где u_{∞} – скорость набегающего потока вдали от цилиндра;

φ – полярный угол, отсчитываемый от передней критической точки цилиндра в направлении обтекания потока (критическими точками называются точки разветвления потока).

При направлении движения, указанном на рис. 1, точка A называется передней критической точкой, точка B – задней.

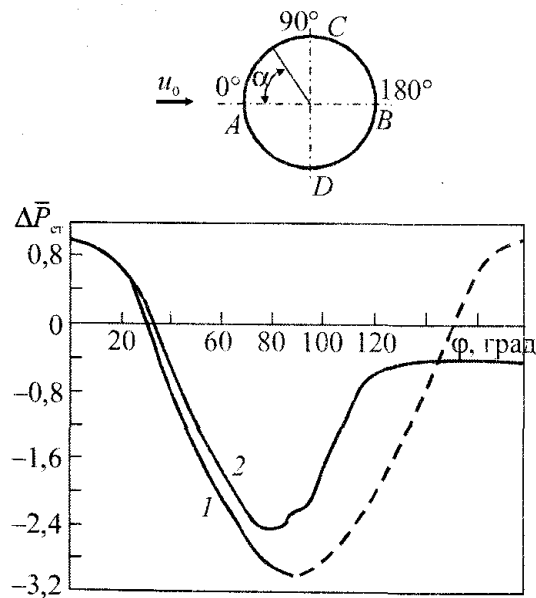


Рисунок 2.6 - Изменение коэффициента давления по поверхности бесконечного цилиндра при поперечном его обтекании: 1 — потенциальное обтекание; 2 — турбулентный режим обтекания ($Re \geq 2 \cdot 10^5$)

В передней критической точке происходит полное торможение потока и скорость $u = 0$. Максимальное значение скорости на поверхности цилиндра принимает в точках C и D миделевого сечения цилиндра, и равна удвоенной скорости невозмущенного потока

$$u_{\text{макс}} = 2u_{\infty}$$

За миделевым сечением цилиндра скорость снижается и в задней критической точке снова становится равной нулю. Согласно уравнению Бернулли

$$p_{\text{ст}} + p_{\text{д}} = p_{\text{ст}\infty} + p_{\text{д}\infty}, \quad (1.2)$$

где $p_{\text{ст}}$, $p_{\text{д}}$, $p_{\text{ст}\infty}$, $p_{\text{д}\infty}$ – статическое и динамическое давление в произвольной точке на поверхности цилиндра и вдали от него.

Относительная разность статического давления (коэффициент давления)

$$\Delta \bar{p}_{\text{ст}} = \frac{p_{\text{ст}} - p_{\text{ст}\infty}}{p_{\text{д}\infty}} = \frac{p_{\text{д}\infty} - p_{\text{д}}}{p_{\text{д}\infty}} = 1 - \frac{p_{\text{д}}}{p_{\text{д}\infty}} \quad (1.3)$$

Для плоского безвихревого обтекания с учетом (1.1) получим

$$\Delta \bar{p}_{\text{ст}} = 1 - 4 \sin^2 \varphi. \quad (1.4)$$

Согласно соотношению (1.4) по бокам обтекаемого цилиндра создается максимальное разрежение, относительное значение которого равно

$$\Delta \bar{p}_{CT.MAKC} = -3.$$

Если полагать, что для возникновения самоокутывания необходимо затормозить поток газов, выходящих из трубы, то для выполнения этого условия необходимо, чтобы значение разрежения, возникающего на поверхности трубы при обтекании ее ветром, было равно по абсолютной величине динамическому давлению газов в устье трубы:

$$|\Delta p_{CT}| = p_{до} \quad (1.5)$$

Разделив обе части соотношения (1.5) на $p_{до}$, получим выражение для гидродинамического параметра J :

$$J = p_{до} / p_{до} = |\Delta p_{CT}| \quad (1.6)$$

Это соотношение является основным для определения условий самоокутывания. Поскольку при поперечном обтекании цилиндра потенциальным потоком наибольшее возникающее разрежение равно $\Delta \bar{p}_{CT} = -3$, то получаем теоретическое решение для условия возникновения самоокутывания: $J \leq 3$. Реальное обтекание цилиндра (трубы) происходит с отрывом потока в кормовой части цилиндра, поэтому распределение давления отличается от теоретического (кривая 2 на рис. 1).

Экспериментальные исследования показали, что процесс самоокутывания газоотводящей трубы зависит главным образом от распределения давления в верхней части трубы, где существенную роль играет краевой эффект обтекания. Для газоотводящих труб при обтекании их потоком ветра характерны большие значения числа Рейнольдса ($Re > 10^6$). Распределение давления по поверхности трубы на крупномасштабной модели газоотводящей трубы при закритических числах Рейнольдса исследовалось в большой аэродинамической трубе А-6 Института механики МГУ.

Проведенные исследования показали, что при $J < 2,4$ в распределении давления по верхней части газоотводящей трубы проявляется краевой эффект обтекания, причем чем меньше значение J , тем этот эффект сильнее. При значениях гидродинамического параметра $J \leq 1,6$ разрежение в верхней части поверхности трубы возрастает при удалении от устья трубы, поэтому периферийная часть дымового факела будет подсасываться по бокам трубы этим разрежением вниз, т.е. будет происходить процесс самоокутывания (рис. б).

Разрежение при удалении от устья трубы вниз при $1,6 < J < 2,4$ сначала возрастает, а затем начинает убывать, поэтому самоокутыванию может подвергаться лишь та часть поверхности трубы, где наблюдается отрицательный градиент давления ($z < 0,5$).

При $J = 2,4$ выходящая из трубы струя обтекается потоком ветра так, что распределение давления по поверхности газоотводящей трубы в верхней ее части оказывается таким же, как и на значительном удалении от устья, т.е. происходит как бы удлинение трубы и характер ее обтекания соответствует обтеканию бесконечного цилиндра.

При $J > 2,4$ проявляется эжектирующее действие выходящей из трубы струи газов и максимальное разрежение возникает на торце трубы, а при удалении от устья трубы вниз разрежение уменьшается, поэтому обтекающий трубу воздух будет подсасываться вверх в дымовой факел. Положительный градиент давления в направлении от устья трубы вниз будет препятствовать опусканию дымовых газов ниже устья трубы.

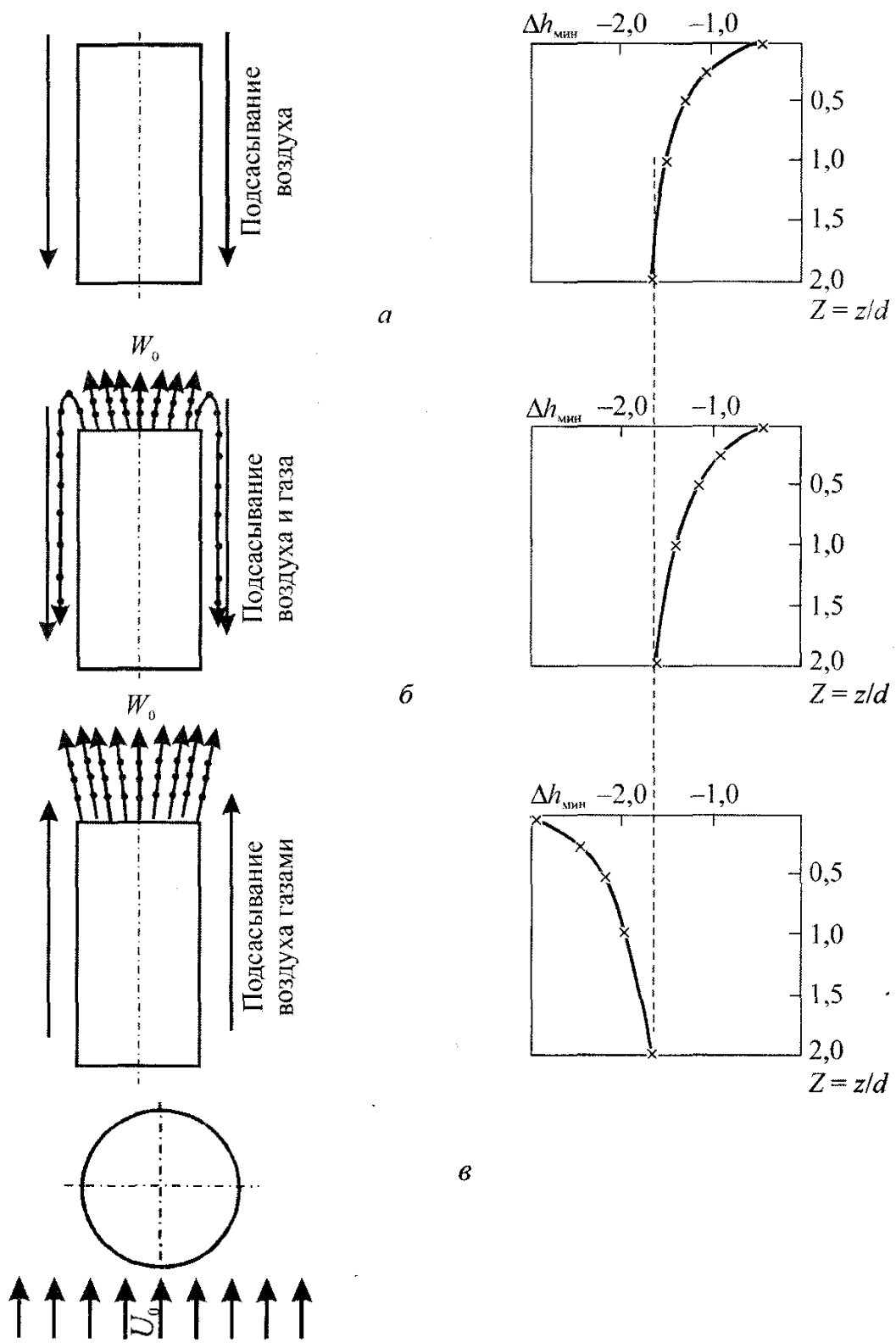


Рисунок 2.7 - Изменение минимальных значений коэффициента давления по высоте трубы:

а) - $J = 0$; б) - $J = 0,2$; в) - $J = 2,4$

Снижение интенсивности коррозии может быть достигнуто рациональным подключением оборудования к газоотводящим стволам и выбором соответствующих скоростей газов в них. При этом следует стремиться к тому, чтобы при расчетном режиме работы оборудования выполнялось соотношение $J = \rho_{\text{д.г.}} / \rho_{\text{д.в.}} \geq 2,4$. Так, например, если на тепловой электростанции к одной одноствольной газоотводящей трубе подключено оборудование, работающее в базовом и пиковом режимах, то вероятность самокутывания будет увеличиваться при отключении пикового оборудования.

В зоне самоокутывания наружную поверхность стволов и оболочек следует защищать противокоррозионными покрытиями. Выбор типа и состава их зависит от характера агрессивной среды. Высота защищаемого участка должна составлять не менее трех наружных верхних диаметров газоотводящей трубы.

2.4. Основы теплотехнического расчета

Поступающие в дымовую трубу продукты горения, имеющие температуру выше температуры окружающей среды, вступают в теплообмен со стенками газоотводящего ствола. Задачей теплотехнического расчета дымовой трубы является определение температурного режима ограждающих конструкций.

Вычисления температурных полей и тепловых потоков в теле ствола дымовой трубы не являются конечной целью, а дают лишь исходные данные, необходимые для определения термических напряжений, которые в общем случае возникают в телах при их жестком закреплении и появлении неоднородного температурного поля.

Вследствие теплового воздействия на элементы трубы на более нагретой поверхности возникают кольцевые и осевые напряжения сжатия, на менее нагретой — растягивающие кольцевые и осевые напряжения. При этом общее тепловое расширение конструктивных элементов дымовой трубы происходит в условиях свободной деформации.

Параметром, определяющим значение термических напряжений в элементах трубы, является градиент температуры, в случае стационарного режима работы — перепад по толщине стенки конструктивного элемента.

Перепады температуры в стенке трубы от воздействия отводимых газов надлежит определять на основании теплотехнических расчетов для установившегося потока тепла при наибольшем значении температуры отводимых газов и расчетной температуре наружного воздуха (средней температуре наиболее холодной пятидневки) и наибольшем значении коэффициента теплоотдачи наружной поверхности.

Для футеровки из кислотоупорной керамики допускаемый температурный перепад принимают равным 80 °С, а для обеспечения надежной работы железобетонного ствола считается оптимальным поддерживать температуру на его внутренней поверхности около 100 °С, хотя по строительным нормам допускается использовать обычный бетон при температуре 200 °С.

Таким образом, при проектировании дымовых труб необходимо знать температурный режим их работы и перепады температур на поверхностях ствола, футеровки и изоляции. От этого во многом зависит надежность работы труб из всех видов материалов, в связи с чем необходимо проводить их тепловой расчет.

Расчет температурных полей ограждающих конструкций дымовых труб выполняют последовательно по зонам. Для стационарного режима температуру по толщине ограждающих конструкций в пределах расчетной зоны определяют по формуле

$$t_x = t_r - (t_r - t_b) / R_0 \left(R_r + \sum_1^x R_i \right),$$

где t_r — температура дымовых газов, °С; t_b — температура (расчетная) наружного воздуха, °С; R_0 — общее термическое сопротивление ограждения теплопередаче

$$R_0 = R_r + \sum_1^n R_i + R_b,$$

R_r — термическое сопротивление при теплоотдаче от дымовых газов к внутренней поверхности ствола, определяется как для цилиндрической стенки среднего для зоны диаметра на 1 м ее высоты:

$$R_r = 1 / \alpha_1 d_1,$$

где d_1 — средний диаметр дымового канала в пределах расчетной зоны, м; α_1 — коэффи-

циент теплоотдачи от дымовых газов к внутренней поверхности дымового канала, Вт/(м²·К)

Коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов, наиболее существенными из которых являются вид движения газа (ламинарный или турбулентный), скорость газа, его теплофизические характеристики (плотность, теплопроводность, теплоемкость, кинематическая вязкость), геометрические размеры трубы, наличие фазовых переходов, и определяется по формуле

$$\alpha_1 = Nu\lambda / d_1,$$

где λ — теплопроводность дымовых газов, Вт/(м·К); Nu — критерий Нуссельта

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} Pr^{0,3} (d_1 / h)^{0,054},$$

где Re — критерий Рейнольдса

$$Re = Wd_1 / \gamma,$$

здесь W — средняя скорость дымовых газов в пределах расчетной зоны, М/с; γ — коэффициент кинематической вязкости дымовых газов, которых при температуре 100°С равен $21,54 \cdot 10^{-6}$ м²/с; Pr — критерий Прандтля; h — высота расчетной зоны, м.

Для цилиндрической стенки термическое сопротивление i -го пояса на 1 м высоты трубы, м·К/Вт, определяют по формуле

$$R_i = \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_i}{d_{i-1}},$$

где d_i , d_{i-1} — наружный и внутренний диаметры i -го пояса трубы, м; λ_i — коэффициент теплопроводности материала i -го пояса Вт/(м·К); R_B — термическое сопротивление при теплоотдаче от наружной поверхности ствола к наружному воздуху.

$$R_B = 1/\alpha_2 d_2,$$

здесь d_2 — средний наружный диаметр ствола в пределах расчетной зоны, м; α_2 — коэффициент теплоотдачи от наружной стенки ствола к воздуху, Вт/(м²·К)

$$\alpha_2 = 5 + 10\sqrt{v_b},$$

где v_b — скорость ветра, м/с.

По результатам проведенных испытаний в зависимости от высотной отметки расчетной зоны принимаются следующие значения коэффициента теплоотдачи: от 0 до 20 м — 23,3 Вт/(м²·К); от 20 до 80 м — 34,9 Вт/(м²·К); от 80 до 120 м — 46,5 Вт/(м²·К); от 120 до 250 м — 58,2 Вт/(м²·К).

При отношении общей толщины слоев ограждающих конструкций трубы к ее наружному диаметру в пределах расчетной зоны меньше чем 1/10 разницей в площадях тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностей можно пренебречь. В этом случае расчет температурных полей ограждающих конструкций дымовой трубы можно вести с использованием формул теплопередачи через плоскую стенку.

Тогда

$$R_r = 1/\alpha_1; \quad R_i = \sigma_i / \lambda_i; \quad R_B = 1/\alpha_2.$$

Передача теплоты является сложным процессом, включающим перенос теплоты кондуктивной теплопроводностью, излучением и конвекцией, и осуществляется посредством:

- теплопроводности твердого скелета, образующего пористую структуру материала;
- теплопроводности газа, находящегося в порах и капиллярах;
- излучения между стенками пор и капилляров;
- конвективного переноса теплоты за счет конвективных токов газа в пористой структуре теплоизоляции.

Однако, в целях упрощения тепловых расчетов, используются расчетные зависимости, основанные на законе Фурье, справедливом, строго говоря, лишь для твердых тел, в которых перенос тепла при наличии градиента температур происходит только за счет кондуктивной теплопроводности. Очевидно, что используемый при таком подходе коэффициент теплопроводности является обобщенной характеристикой проводимости теплоты в матери-

але – эффективной теплопроводностью:

$$\lambda_{эф} = \lambda_q + \lambda_p + \lambda_k \quad (1.2)$$

где λ_q – коэффициент кондуктивной, λ_p – радиационной, λ_k – конвективной теплопроводности.

2.5. Основы силового расчета

Суть силового расчета заключается в определении напряженно-деформированного состояния конструкции и его сопоставлении с вычисленной несущей способностью и ограничениями по деформациям и другим условиям.

Основные положения по расчету на силовые воздействия, согласно ГОСТ 27751-88 [] следующие:

1. Строительные конструкции и основания должны быть запроектированы таким образом, чтобы они обладали достаточной надежностью при возведении и эксплуатации с учетом, при необходимости, особых воздействий (например, в результате землетрясения, наводнения, пожара, взрыва).

2. Основным свойством, определяющим надежность строительных конструкций, зданий и сооружений в целом, является безотказность их работы - способность сохранять заданные эксплуатационные качества в течение определенного срока службы.

3. Строительные конструкции и основания следует рассчитывать по методу предельных состояний, основные положения которого должны быть направлены на обеспечение безотказной работы конструкций и оснований с учетом изменчивости свойств материалов, грунтов, нагрузок и воздействий, геометрических характеристик конструкций, условий их работы, а также степени ответственности (и народнохозяйственной значимости) проектируемых объектов, определяемой материальным и социальным ущербом при нарушении их работоспособности.

4. Предельные состояния подразделяются на две группы:

первая группа включает предельные состояния, которые ведут к полной непригодности к эксплуатации конструкций, оснований (зданий или сооружений в целом) или к полной (частичной) потере несущей способности зданий и сооружений в целом;

вторая группа включает предельные состояния, затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкций (оснований) или уменьшающие долговечность зданий (сооружений) по сравнению с предусматриваемым сроком службы.

Предельные состояния первой группы характеризуются:

разрушением любого характера (например, пластическим, хрупким, усталостным) (1a);

потерей устойчивости формы, приводящей к полной непригодности к эксплуатации (1b);

потерей устойчивости положения (1c);

переходом в изменяемую систему (1d);

качественным изменением конфигурации (1e);

другими явлениями, при которых возникает необходимость прекращения эксплуатации (например, чрезмерными деформациями в результате ползучести, пластичности, сдвига в соединениях, раскрытия трещин, а также образованием трещин) (1f).

Предельные состояния второй группы характеризуются:

достижением предельных деформаций конструкций (например, предельных прогибов, поворотов) или предельных деформаций основания (2a);

достижением предельных уровней колебаний конструкций или оснований (2b);

образованием трещин (2c);

достижением предельных раскрытий или длин трещин (2d);

потерей устойчивости формы, приводящей к затруднению нормальной эксплуатации (2e);

другими явлениями, при которых возникает необходимость временного ограничения эксплуатации здания или сооружения из-за неприемлемого снижения их срока службы (например, коррозионные повреждения) (2f).

Предельные состояния, по которым требуется выполнять расчеты, определяются стандартами на проектирование.

5. Расчет по предельным состояниям имеет целью обеспечить надежность здания или сооружения в течение всего его срока службы, а также при производстве работ.

Условия обеспечения надежности заключается в том, чтобы расчетные значения нагрузок или ими вызванных усилий, напряжений, деформаций, перемещений, раскрытий трещин не превышали соответствующих им предельных значений, устанавливаемых нормами проектирования конструкций или оснований.

6. Расчетные модели (в том числе расчетные схемы, основные предпосылки расчета) конструкций и оснований должны отражать действительные условия работы зданий или сооружений, отвечающие рассматриваемой расчетной ситуации. При этом должны учитываться факторы, определяющие напряженное и деформированное состояния, особенности взаимодействия элементов конструкций между собой и с основанием, пространственная работа конструкций, геометрическая и физическая нелинейности, пластические и реологические свойства материалов и грунтов, наличие трещин в железобетонных конструкциях, возможные отклонения геометрических размеров от их номинальных значений.

При возведении новых зданий и сооружений, примыкающих к ранее построенным (или возводимым в непосредственной близости к ним) необходимо учитывать возможное их взаимное влияние.

7. При отсутствии надежных теоретических методов расчета или проверенных ранее аналогичных решений, расчет конструкций и оснований может производиться на основе специально поставленных теоретических или экспериментальных исследований на моделях или натурных конструкциях.

8. Расчет конструкций, для которых нормы проектирования не содержат указаний по определению усилий и напряжений с учетом неупругих деформаций, производится в предположении их упругой работы; при этом сечения допускается рассчитывать с учетом неупругих деформаций.

9. Расчет оснований должен выполняться с использованием механических параметров грунтов (например, их прочностных, деформационных характеристик). В расчетах допускается использовать и другие параметры, характеризующие взаимодействие конструкций с основанием и устанавливаемые опытным путем.

10. При расчете конструкций должны рассматриваться следующие расчетные ситуации:

- установившаяся, имеющая продолжительность того же порядка, что и срок службы строительного объекта (например, эксплуатация между двумя капитальными ремонтами или изменениями технологического процесса);

- переходная, имеющая небольшую по сравнению со сроком службы строительного объекта продолжительность (например, возведение сооружения, капитальный ремонт, реконструкция);

- аварийная, имеющая малую вероятность появления и небольшую продолжительность, но являющаяся весьма важной с точки зрения последствий достижения предельных состояний, возможных при ней (например, ситуация, возникающая в связи со взрывом, столкновением, аварией оборудования, пожаром, а также непосредственно после отказа какого-либо элемента конструкции).

Расчетные ситуации характеризуются расчетной схемой конструкции, видами нагрузок, значениями коэффициентов условий работы и коэффициентов надежности, перечнем предельных состояний, которые должны рассматриваться в данной ситуации.

2.5.1. Нагрузки и воздействия, реакция на них сооружения, особенности учета при расчете и проектировании

Нагрузки и воздействия на дымовые трубы, коэффициенты надежности по нагрузке, а также возможные сочетания нагрузок должны приниматься согласно требованиям СНиП 2.01.07-85.

При проектировании учитываются нагрузки и воздействия, возникающие при возведении и эксплуатации сооружений, а также при изготовлении, хранении и перевозке строительных конструкций.

НОРМАТИВНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАГРУЗОК

Основными характеристиками нагрузок являются их нормативные значения.

Нормативные значения нагрузок определяются:

для нагрузок от собственного веса - по проектным значениям геометрических и конструктивных параметров и по средним значениям плотности с учетом имеющихся данных предприятий-изготовителей об ожидаемой массе конструкции;

для атмосферных нагрузок (например, ветровой, снеговой, гололедной) и воздействий (например, температурных, влажностных) - по наибольшему годовым значениям, соответствующим определенному среднему периоду их превышения; нормативные значения атмосферных нагрузок, которые могут вызывать в конструкциях динамические усилия или деформации, должны определяться с учетом динамических явлений и динамических характеристик конструкций;

для технологических статических нагрузок (например, от оборудования, приборов, материалов, обстановки, людей) - по ожидаемым наибольшим значениям для предусмотренных условий изготовления, эксплуатации или производства работ, с учетом паспортных данных оборудования;

для технологических динамических нагрузок (от движущихся механизмов, машин, транспортных средств) - по значениям параметров, определяющим динамические нагрузки, или по значениям масс и геометрических размеров движущегося механизма или частей машины в соответствии с ее кинематической схемой и режимом работы;

для сейсмических и взрывных воздействий, а также для нагрузок, вызываемых резкими нарушениями технологического процесса, временной неисправностью или поломкой оборудования - в соответствии с требованиями специальных нормативных документов.

Возможное отклонение нагрузок в неблагоприятную (большую или меньшую) сторону от их нормативных значений вследствие изменчивости нагрузок или отступлений от условий нормальной эксплуатации учитывается коэффициентами надежности по нагрузке γ_f . Значения коэффициентов γ_f могут быть различными для различных предельных состояний и различных ситуаций.

Расчетное значение нагрузки получается путем умножения нормативного значения на соответствующий коэффициент надежности по нагрузке.

При наличии статистических данных расчетные значения нагрузок допускается определять непосредственно по заданной вероятности их превышения.

При определении нормативных и расчетных значений нагрузок, изменяющихся во времени, допускается учитывать предусматриваемый срок службы здания или сооружения.

Конструкции и основания следует рассчитывать с учетом возможных неблагоприятных сочетаний нагрузок (для сечений элементов, конструкций и их соединений, либо для всего здания или сооружения в целом). Уменьшение вероятности одновременного превышения несколькими нагрузками их расчетных значений по сравнению с вероятностью превышения одной нагрузкой ее расчетного значения учитывается коэффициентами сочетаний нагрузок ψ .

Примечание. Под «несколькими нагрузками» следует принимать как несколько нагрузок разных видов, так и несколько нагрузок одного вида.

В зависимости от продолжительности действия нагрузок следует различать постоянные и временные (длительные, кратковременные, особые) нагрузки.

Постоянными нагрузками являются:

- а) вес частей сооружений,
- б) вес и давление грунтов,
- в) сохраняющиеся в конструкции усилия от предварительного напряжения.

К длительным нагрузкам относятся:

- в) избыточное давление и разрежение в стволе трубы
- д) температурные технологические воздействия;
- ж) вес отложений пыли и конденсата, если их накопление не исключено соответствующими мероприятиями;
- к) снеговые нагрузки с пониженным расчетным значением, определяемым умножением полного расчетного значения на коэффициент 0,5;
- л) температурные климатические воздействия с пониженными нормативными значениями,
- м) воздействия, обусловленные деформациями основания, не сопровождающимися коренным изменением структуры грунта, а также оттаиванием вечномерзлых грунтов;
- н) воздействия, обусловленные изменением влажности, усадкой и ползучестью материалов.

К кратковременным нагрузкам относятся:

- а) нагрузки, возникающие при изготовлении, хранении и перевозке конструкций, а также при возведении сооружений;
- б) нагрузки от оборудования, возникающие в пускоостановочном, переходном и испытательном режимах, а также при его перестановке или замене;
- в) вес людей, ремонтных материалов в зонах обслуживания и ремонта оборудования;
- г) снеговые нагрузки с полным расчетным значением;
- е) температурные климатические воздействия с полным нормативным значением;
- д) ветровые нагрузки;
- е) гололедные нагрузки.

К особым нагрузкам относятся:

- а) сейсмические воздействия;
- б) взрывные воздействия;
- в) нагрузки, вызываемые резкими нарушениями технологического процесса, временной неисправностью или поломкой оборудования;
- г) воздействия, обусловленные деформациями основания, сопровождающимися коренным изменением структуры грунта (при замачивании просадочных грунтов) или оседанием его в районах горных выработок и в карстовых.

Расчет конструкций и оснований по предельным состояниям первой и второй групп выполняется с учетом неблагоприятных сочетаний нагрузок или соответствующих им усилий. Эти сочетания устанавливаются из анализа реальных вариантов одновременного действия различных нагрузок для рассматриваемой стадии работы конструкции или основания.

В зависимости от учитываемого состава нагрузок различаются:

- а) основные сочетания нагрузок, состоящие из постоянных, длительных и кратковременных;
- б) особые сочетания нагрузок, состоящие из постоянных, длительных, кратковременных и одной из особых нагрузок.

При учете сочетаний, включающих постоянные и не менее двух временных нагрузок, расчетные значения временных нагрузок или соответствующих им усилий берутся с коэффициентом сочетаний $\gamma_1 = 0,95 \dots 0,8$, при этом особая нагрузка принимается без снижения.

2.5.1.1. Особенности учета собственного веса

В дымовых трубах собственный вес их частей кроме непосредственного действия может вызывать дополнительные усилия при крене трубы и искривлении ствола. Искривление ствола в частности может быть вызвано односторонним солнечным нагревом. При этом возникают моменты, дополнительно к тем, которые вызваны ветровой нагрузкой. Простое суммирование этих моментов может дать большую погрешность в опасную сторону, поэтому расчет должен вестись как сжато-изогнутого элемента по деформированной схеме, то есть с учетом прибавки момента, вызванной действием продольной силы при деформации элемента.

2.5.1.2. Температурные технологические воздействия

Температурные воздействия относятся к дилатационным воздействиям, они являются распределенными во всем объеме и за счет этого вызванные ими термические напряжения могут быть весьма существенными. Исходными данными для определения термических напряжений являются вычисления температурных полей и тепловых потоков в теле газоотводящего ствола дымовой трубы.

Рассмотрим полоску, вырезанную из ствола трубы (рис...). При разных температурах на внутренней и наружной поверхностях полоска стремится изогнуться, но этому мешают соседние участки ствола. То есть реактивные силы от них выгибают полоску в обратном направлении. При сохранении формы оболочки этот обратный выгиб равен температурному искривлению свободной полоски, при этом деформации на наружной и внутренней поверхности уравниваются между собой.

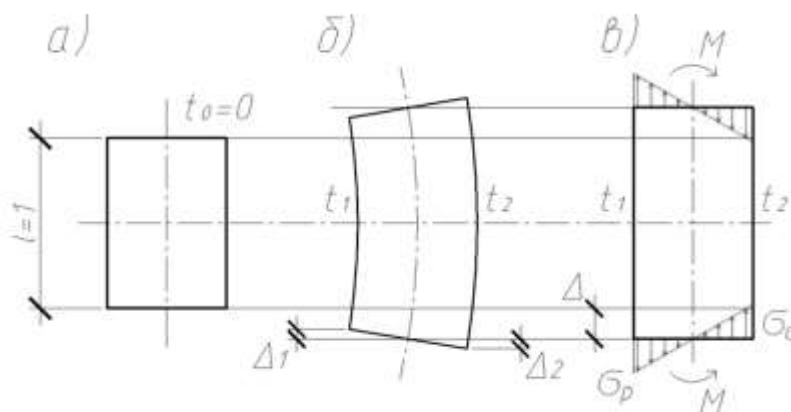


Рис. Схема к определению термических напряжений

Исходя из схемы, показанной на рис....,

$$\Delta = 0,5 \frac{\alpha(t_1 + t_2)}{2}, \quad \Delta_1 = \Delta - \frac{\alpha t_1}{2}, \quad \Delta_2 = \frac{\alpha t_2}{2} - \Delta.$$

Величина термических напряжений составляет....

$$\sigma_p = \Delta_1 E = 0,25E(t_2 - t_1), \quad \sigma_c = \Delta_2 E = 0,25E(t_2 - t_1).$$

Как видим, величина термических напряжений непосредственно зависит только от модуля упругости материала ствола E и от перепада температур внутренней и наружной поверхности ствола $(t_2 - t_1)$. Толщина стенки ствола оказывает влияние на температурные напряжения через изменение с толщиной термического сопротивления, которое влияет на перепад температур стенок ствола.

Применительно к стволу кирпичной или железобетонной дымовой трубы для осевого направления температурные напряжения увеличивают напряжения сжатия на внутренней поверхности ствола и может быть исчерпание прочности на сжатие бетона или кирпичной кладки. На наружной поверхности возникающие осевые растягивающие напряжения в значительной мере компенсируются сжатием от собственного веса, а в случае его недостаточности воспринимаются устанавливаемой продольной арматурой. Для кольцевого направления температурные сжимающие напряжения на внутренней поверхности ствола не опасны, а для восприятия растягивающих температурных напряжений на наружной поверхности требуется постановка стяжных колец или кольцевое армирование.

Поскольку реальное положение несколько отличается от идеализированной схемы, представленной на рис...., то в нормативных методах расчета (например [...]) учитывается

изменение с температурой модуля упругости материала E и ряд других факторов.

Для дымовых труб с газоотводящим каналом, совмещенным с основными несущими конструкциями, термические напряжения могут быть больше, чем от всех других нагрузок и воздействий.

2.5.1.3. Ветровые нагрузки

Для газоотводящих труб, представляющих собой высотные сооружения башенного типа, ветровая нагрузка имеет определяющее значение.

Сила и характер ветра, преимущественные направления сильных ветров определяется климатическими условиями и рельефом местности. Ветер редко бывает ровным, обычно наблюдаются порывы, вызванные торможением частиц воздуха о поверхность земли, конвекционными токами между различно нагретыми слоями, трением между слоями, движущимися с различной скоростью. Это приводит к пульсации скорости ветра. Интенсивность порывов ветра затухает с высотой. Порывы ветра характеризуются коэффициентом порывистости, являющимся отношением наибольшей скорости в порыве к средней за определенный промежуток времени. Коэффициент порывистости убывает с увеличением средней скорости ветра. Период пульсации ветра – от нескольких минут при большой величине средней скорости и до одной минуты при малой.

Статистическая обработка показала, что для высоты 20м можно принять коэффициент пульсации $m = 0,25 \dots 0,35$, для высот более 20м над поверхностью земли его определяют по формуле:

$$m_z = m_{20} \left(\frac{20}{z} \right)^{\frac{1}{n}},$$

где z - высота рассматриваемой точки, $n = 8 \dots 12$.

Сама природа ветра, когда на среднюю скорость накладываются порывы ветра, подсказывает представление ветровой нагрузки в виде двух компонент, одна из которых статическая, другая динамическая, тогда расчетный скоростной напор запишем в виде: $q_p = n(q_0 + q_d)$, где n - коэффициент надежности по ветровой нагрузке, учитывающий возможное повышение нормативного скоростного напора q_0 . Если ввести в формулу коэффициент пульсации скоростного напора m , определяемый ранее, и коэффициент динамичности, учитывающий реакцию сооружения на пульсацию ветра ξ , тогда расчетный скоростной напор ветра $q_p = nq_0(1 + \xi m)$, или $q_p = n\beta q_0$, где $\beta = 1 + \xi m$ - коэффициент, учитывающий динамический характер воздействия порывов ветра. Действие порывов ветра на сооружении зависит от периода свободных колебаний и, что не менее важно, от затухания, характеризуемого чаще всего логарифмическим декрементом δ . Последний зависит от вида основного материала и конструктивного решения. Декремент затухания, определяемый опытным путем, принимают по данным о поведении подобных конструкций.

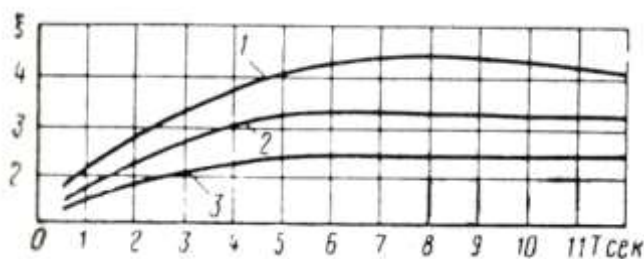


Рисунок 1. Коэффициент динамичности в зависимости от периода свободных колебаний сооружений

1-для гибких стальных сооружений ($\delta \approx 0.1$)

2-для металлических и деревянных сооружений ($\delta \approx 0.15$)

3- для железобетонных и каменных сооружений ($\delta \approx 0.3$)

Влияние порывов ветра на сооружение становится пренебрежимо малым, если период его собственных колебаний меньше 0,25сек. Период свободных колебаний сооруже-

ния находят обычным путем, после чего по графику, представленному на рисунке 1, находят коэффициент ξ для рассматриваемого вида конструкций, а затем – коэффициент β .

Коэффициент надежности по ветровой нагрузке n согласно СНиП равен 1,4, а вообще он зависит от назначения сооружения, планируемого срока службы и роли ветра в общем комплексе нагрузок, поэтому для дымовых труб он может приниматься до 1,5.

При проектировании уникальных сооружений большой высоты требуется более тщательное рассмотрение ветровой нагрузки, в котором наряду с рациональным назначением величины скоростного напора ветра большое внимание уделяют аэродинамическому комплексу вопросов.

Ветровую нагрузку на высокие сооружения консольного типа высотой менее 150 м допускается определять при учете свободных колебаний только по первой форме, т.е. по основному тону. Высокие сооружения консольного типа высотой более 150м рассчитывают на ветровую нагрузку с учетом не более первых трех форм колебаний.

Довольно часто наблюдаются поперечные к потоку ветра колебания многих видов конструкций в виде цилиндра кругового очертания. Рассмотрим более подробно поведение круглого цилиндра в потоке воздуха.

Воздух обладает вязкостью, поэтому не может быть полного (плавного) обтекания. Слой, непосредственно прилегающий к цилиндру, не скользит свободно, а как бы прилипает к стенке, в результате чего возникают тангенциальные силы, направленные по касательной к поверхности тела. Эти силы и являются собственно силами трения. Силы вязкости вносят качественные изменения в картину обтекания.

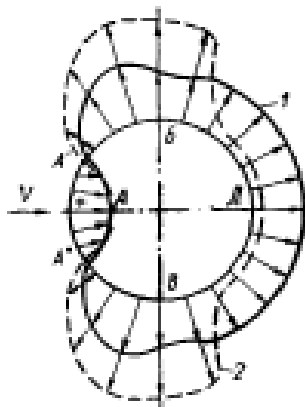


Рисунок 2. Распределение давления по поверхности круглого цилиндра в потоке вязкой жидкости

Равнодействующая распределенных сил, действующих на стенки цилиндра, не равна нулю. Эту силу называют лобовым сопротивлением, составляющими которой являются силы трения и собственно давление.

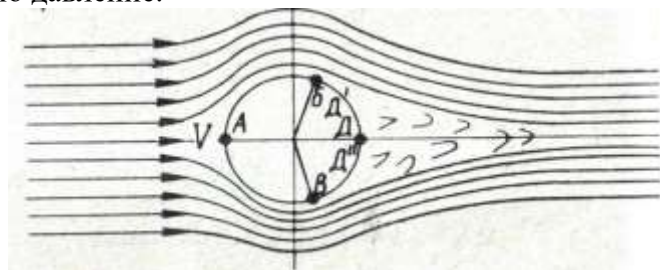


Рисунок 3 Обтекание круглого цилиндра потоком вязкой жидкости

Силы вязкости приводят к отрыву пограничного слоя и образованию позади тела вихреобразного движения жидкости (рис. 3). Давление вязкой жидкости на цилиндр в точке А почти не отличается от давления при обтекании его идеальной жидкостью. Но движение в пограничном слое тормозится и частицы жидкости приходят в точки В и В с

меньшими скоростями, чем в случае обтекания его идеальной жидкостью, т.е. он будет обладать меньшей кинетической энергией. В точках Д' и Д'' давление поэтому будет больше, чем в точках Б и В, но меньше p_d . В результате этого струи воздуха отрываются от цилиндра, так как не могут проникнуть в область Д'ДД'', заполненную вихреобразно движущейся жидкостью. Отрыв пограничного слоя вносит качественное изменение в обтекание тела потоком жидкости, которое не ограничивается лишь появлением лобового сопротивления, а сопровождается образованием вихрей, срывающихся с цилиндра и уносимых потоком жидкости. Они рассеиваются далеко позади цилиндра. Явление вихреобразования происходит так: по любой нормали к поверхности цилиндра скорость жидкости постепенно возрастает от нулевой, которую имеет слой, непосредственно прилегающий к стенке, до скорости потока за пределами пограничного слоя, толщина которого мала. Объем жидкости в пограничном слое обладает моментом количества движения относительно оси, нормальной к плоскости потока и проходящей через центр объема. Такое движение жидкости обладает завихренностью, поэтому наряду с поступательным движением жидкости происходит и вращательное движение. Тонкие слои неустойчивы, они распадаются на отдельные вихри, уносимые потоком. Вихри располагаются за цилиндром в шахматном порядке, так как симметричное расположение вихрей – один над другим в дорожке – неустойчиво, что подтверждается многочисленными опытами и наблюдениями природы.

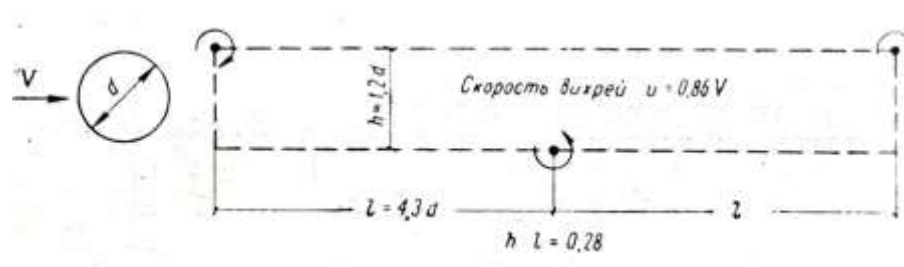


Рисунок 4 Схема вихревой дорожки за круглым цилиндром

При отрыве вихря с цилиндра возникает подъемная сила, заставляющая его перемещаться в направлении поперек потока до тех пор, пока не установится равновесие. После этого цилиндр под влиянием восстанавливающей силы (упругости материала) начнет двигаться в противоположном направлении. Если скорость потока такова, что через промежуток времени, равный полупериоду колебаний, сорвется вихрь с другой стороны, то возникнет подъемная сила обратного знака, стимулирующая начавшиеся под влиянием восстанавливающей силы движение. Через полупериод снова возникнет из-за срыва вихря подъемная сила, которая будет поддерживать возникшие поперечные к потоку колебания.

Реакция сооружения может быть особенно сильной, когда происходит захватывание частоты образования вихрей собственной частотой сооружения (явление ветрового резонанса).

Частота срыва вихрей в большом интервале чисел Рейнольдса определяется числом Струхала: $Sh = nd / V$, где d -диаметр цилиндра, м; n -частота свободных колебаний сооружения, Гц, V – скорость ветра, м/с. Для цилиндра, при всех числах Рейнольдса, кроме интервала очень малых чисел, $Sh = 0,2$. Отсюда критическая скорость ветра, при котором возникает явление ветрового резонанса, определяется формулой $V_{кр} = 5 nd$.

При скорости ветра 25м/с и более амплитуды поперечных к ветру колебаний малы, а движения нерегулярны. Это позволяет не проводить дополнительного расчета на ветровой резонанс, если критическая скорость ветра выше 25м/с.

Результирующий динамический изгибающий момент M' под воздействием ветровой нагрузки при «резонансной» скорости $V_{кр}$ и аэродинамических сил, вызывающих моменты в плоскости, перпендикулярной потоку, рассчитывается по формуле геометрического сложения: $M' = \sqrt{M_d^2 + M_{вкк}^2}$, где $V_{кр} > 10 м/с$, но не более 25м/с.

Изгибающий момент $M_{вкр}$ определяется с учетом динамического коэффициента β .

При $V_{кр} \leq 10 м/с$ расчетный изгибающий момент разрешается принимать равным M_{δ} .

Действующие на сооружение аэродинамические силы определяются по формуле

$$F(x, t) = \frac{4}{\pi} F_0 \alpha(x) \sin \omega t = F_1(x) \sin \omega t, \text{ где } F_0 = \frac{V_{кр}^2 d}{64} - \text{наибольшая амплитуда силы, кг/м, у}$$

свободного конца консольного цилиндра; $\alpha(x) = \frac{X(x/h)}{X_1(x/h)_{x=x_1}}$ - коэффициент формы коле-

баний;

$X(x/h)$ - функция, определяющая первую форму свободных колебаний сооружения;

x - текущая координата, отсчитываемая по вертикали от начала координат;

x_1 - расстояние от сечения с наибольшей амплитудой до начала координат;

h - высота сооружения; t - время, сек; ω - круговая частота первой формы свободных колебаний сооружения.

Для упруго защемленного в фундаменте консольного цилиндрического сооружения

$$y_{\delta} = 0,8 \frac{\pi}{\delta} y_{cm}, \text{ где}$$

имеем:

$$M_{\delta} = 0,8 \frac{\pi}{\delta} M_{cm}$$

y_{δ}, M_{δ} - статический прогиб и изгибающий момент в рассматриваемом сечении под действием нагрузки $F_1(x)$;

δ - логарифмический декремент затухания;

0,8 - коэффициент, учитывающий малую вероятность возникновения плоскопараллельного потока ветра по всей высоте сооружения.

Картина обтекания круглого цилиндра определяется в основном местом отрыва пограничного слоя, толщина которого мала. Это открывает путь управления колебаниями с помощью небольших по высоте препятствий – интерцепторов, так как не стоит сильно увеличивать ветровую нагрузку. Наилучшее действие оказывают спиральные интерцепторы, кроме того, они на меньшую величину повышают сопротивление конструкции ветру. Исследовались аэродинамические устройства в виде намотки проволоки по спирали вдоль цилиндра для создания сдвига фаз в срыве вихрей по высоте, тем самым достигалось уменьшение раскачивающей силы, вызванной срывом вихрей. Выяснено, что не всякая намотка проволоки вдоль цилиндра гасит колебания. Из всех рассмотренных вариантов проволочных гасителей наилучшим оказался вариант с намоткой четырех проволок с относительной толщиной $d_n / D \approx 1/200$ под углом $\varphi \approx 11^\circ$. Имеются и другие типы аэродинамических устройств.

Круглые цилиндры раскачиваются со значительно большей амплитудой, чем круглые усеченные конусы, что объясняется изменением частоты срыва вихрей по высоте последних. Поэтому при коничности дымовых труб более 0,012 расчет их на ветровой резонанс допускается не производить.

2.5.2. Нормативные и расчетные значения прочностных и других характеристик материалов и грунтов

Основными параметрами прочности материалов являются нормативные значения их прочностных характеристик. Обеспеченность нормативных значений прочностных характеристик материала должна быть не менее 0,95.

Кроме нормативных значений прочностных характеристик, могут устанавливаться также нормативные значения других характеристик материалов, (например, плотностей, модулей упругости, коэффициентов трения, ползучести, усадки), принимаемые, как правило, равными их математическому ожиданию.

При расчете конструкций, работающих при высоких или низких температурах, повышенной влажности, при повторных воздействиях, следует учитывать изменения физико-механических свойств материалов (прочности, упругости, вязкости) и других явлений (например, ползучести, усадки).

Основными параметрами механических свойств грунтов являются нормативные или расчетные значения прочностных, деформационных и других физико-механических характеристик грунтов. Нормативные значения характеристик грунта или параметров, определяющих взаимодействие фундаментов с грунтом, принимаются равными их математическому ожиданию и устанавливаются на основе данных инженерных изысканий, выполняемых для проектируемого здания или сооружения, или на основе опыта проектирования и строительства.

Возможные отклонения прочностных и других характеристик материалов и грунтов в неблагоприятную сторону от их нормативных значений учитываются коэффициентами надежности по материалу γ_m и γ_g . Значения коэффициентов γ_m и γ_g могут быть различными для различных предельных состояний.

Расчетным значением характеристики материала или грунта является значение, получаемое делением нормативного значения характеристики на коэффициент надежности по материалу или грунту.

2.5.3. Проектирование ствола трубы

Выбор конструктивной схемы, основных параметров, материала и конструкции дымовой трубы осуществляется на основании предварительных расчетов.

В целях предупреждения проникания дымовых газов в несущие конструкции кирпичных и железобетонных труб с газопроницаемой футеровкой не допускается избыточное статическое давление внутри дымового канала. При наличии избыточного статического давления следует применять трубу специальной конструкции (с внутренним газопроницаемым газоотводящим стволом или противодавлением в вентилируемом зазоре между стволом и футеровкой).

В дымовых трубах с противодавлением (в зависимости от режима работы) следует применять естественную или принудительную вентиляцию воздушного зазора. Величина противодействия должна приниматься в каждом сечении трубы не менее 50 Па (5 кгс/м²).

При подключении нескольких агрегатов к трубе и колебаниях нагрузки, вызывающих образование конденсата, допускается при наличии технико-экономического обоснования проектировать многоствольные трубы с несколькими газоотводящими стволами, расположенными внутри несущего ствола трубы.

В пространстве между несущими и газоотводящими стволами следует предусматривать кольцевые площадки, ходовые лестницы, электрическое освещение, а также лифт при наличии специального обоснования.

Минимальный диаметр верхней части наружного несущего ствола в случае расположения внутри него нескольких газоотводящих стволов следует определять из условий размещения требуемого числа газоотводящих стволов и лифта, а также необходимых проходов для монтажа, контроля в процессе эксплуатации и производства работ.

Газоотводящие стволы следует выполнять из металла, а также из неметаллических термостойких материалов.

С наружной стороны газоотводящих стволов следует устанавливать тепловую изоляцию, толщина которой определяется расчетом исходя из обеспечения при нормальном режиме эксплуатации заданного перепада температуры газа и внутренней поверхности ствола, а также температуры наружной поверхности тепловой изоляции не свыше 60 °С.

При расчете дымовых труб по предельным состояниям первой группы необходимо учитывать одновременное действие нагрузки от собственного веса, расчетной ветровой нагрузки, а также влияние температуры отводимых газов, при расчете по предельным состояниям второй группы - одновременное действие нагрузки от собственного веса, нагрузки от ветра, а также влияние температуры отводимых газов и солнечной радиации.

Дымовые цилиндрические трубы и трубы небольшой коничности (не более 0,012) следует рассчитывать на скоростной напор ветра и резонанс в соответствии с требованиями СНиП 2.01.07-85. Конические трубы с коничностью более 0,012 на резонанс допускается не проверять.

В качестве расчетной схемы дымовой трубы следует принимать заземленный в основании консольный стержень постоянного или переменного по высоте кольцевого сечения. Для труб с оттяжками расчетная схема принимается в виде консольного стержня, заземленного в основании с упругими опорами в местах оттяжек.

Определение изгибающих моментов в горизонтальных сечениях ствола трубы необходимо производить по деформированной схеме с учетом дополнительных изгибающих моментов от собственного веса вследствие прогиба трубы от ветра, температуры, солнечной радиации и крена фундамента.

Для учета кольцевых напряжений в поперечном сечении, а также дополнительных моментов от прогиба трубы при воздействии солнечной радиации необходимо учитывать распределение разности температур по наружной поверхности от 25 °С на солнечной стороне до 0 °С на границе с теневой стороной.

Горизонтальное перемещение верха трубы от нормативной ветровой нагрузки не должно превышать 1/75 ее высоты. При наличии лифта предельное горизонтальное перемещение верха трубы следует принимать в соответствии с техническими условиями на данный лифт.

Расчетную длину при определении форм свободных колебаний и проверке несущей способности горизонтальных сечений для свободно стоящих труб следует принимать равной высоте трубы, умноженной на коэффициент 1,12.

2.5.4. Проектирование и расчет оснований и фундаментов []

К расчету оснований и фундаментов приступают после определения действующих на них нагрузок, то есть после расчета и основного конструирования ствола трубы.

Проектирование и расчет оснований и фундаментов проводится в соответствии с СП 50-101-2004, СНиП 2.02.01-83* и СНиП 52-01-2003.

Основания и фундаменты должны проектироваться на основе и с учетом:

- а) результатов инженерных изысканий для строительства;
- б) сведений о сейсмичности района строительства;
- в) данных, характеризующих назначение, конструктивные и технологические особенности сооружения и условия его эксплуатации;
- г) нагрузок, действующих на фундаменты;
- д) окружающей застройки и влияния на нее вновь строящихся сооружений;
- е) экологических требований;
- ж) технико-экономического сравнения возможных вариантов проектных решений для выбора наиболее экономичного и надежного проектного решения, обеспечивающего наиболее полное использование прочностных и деформационных характеристик грунтов и физико-механических свойств материалов фундаментов.

При высоком уровне подземных вод и подземном расположении газоходов следует предусматривать дренаж.

Площадь подошвы фундамента определяется из условия обеспечения несущей способности основания и ограничения осадок.

Конструкции фундаментов должны удовлетворять требованиям расчета по несущей способности (предельные состояния первой группы: продавливание, изгиб и т.д.) и по пригодности к нормальной эксплуатации (предельные состояния второй группы: образование и раскрытие трещин). Расчеты следует выполнять в соответствии с указаниями СНиП 52-01 и СНиП II-22.

Фундаменты дымовых труб должны проектироваться железобетонными с подошвой круглого, многоугольного или кольцевого очертания в соответствии с требованиями СНиП 2.02.01-83 и СНиП 2.02.03-85. Для дымовых труб высотой более 200 м фундамент следует выполнять кольцевого очертания. Очертание разделенных фундаментов для опо-

ры поясов решетчатого каркаса башен-труб как правило прямоугольное.

Предельные значения осадок и кренов для фундаментов труб должны приниматься по СНиП 2.02.01-83*.

Минимальное давление на грунт под фундаментом трубы должно быть более нуля, то есть отрыв по подошве фундамента не допускается.

При наличии температурного перепада по высоте плиты фундамента необходимо при расчете фундаменте учитывать температурные усилия, определяемые согласно СНиП 2.03.04-84.

Расчет фундаментов под дымовые трубы с круглой (рис.10,а) или кольцевой (рис.10,б) плитой производят по методу предельного равновесия.

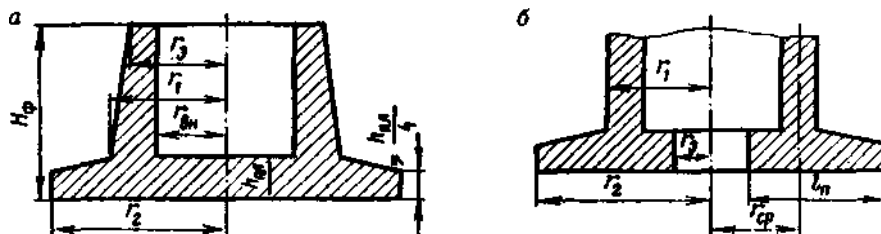


Рис. 10. Фундаменты дымовых труб

а - железобетонный с круглой плитой; б — железобетонный с кольцевой плитой

Фундаментная плита условно рассчитывается на равномерную нагрузку P снизу, интенсивность которой равна наибольшему напряжению грунта под серединой консольного выступа фундамента, за вычетом нормативной нагрузки сверху от собственного веса плиты фундамента и веса грунта на консолях. Исходя из этой схемы определяются изгибающие моменты в консольных выступах фундамента и производится подбор арматуры. Кроме того, плита должна удовлетворять условиям скалывания (продавливания).