

## **УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ, ВОЗНИКАЮЩИЙ В ВЫСОТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБАХ**

*ПИДЛОЖЕВИЧ А. Н.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

**Введение.** Дымовые трубы являются распространенными, ответственными и дорогостоящими инженерными сооружениями, работающими в чрезвычайно тяжелых условиях: под воздействием высоких ветровых нагрузок, перепадов температуры и агрессивных дымовых газов, движущихся внутри трубы. Высота труб варьируется от 20 до 419,7 м. От агрессивности среды значительно снижается расчетный срок службы дымовых труб. Учитывая, что их средний возраст эксплуатации превышает 50 лет (а в некоторых случаях гораздо больше), возникает необходимость диагностики и осмотра сооружений.

**Назначение промышленных дымовых труб.** Промышленные дымовые трубы служат как для создания естественной тяги, так и для отвода дымовых газов в верхние слои атмосферы и рассеивания их до допустимых концентраций, которые регламентируются действующими санитарными нормами.

В соответствии с назначением труб, которые полностью обеспечивают тягу, создающую необходимый приток воздуха в рабочее пространство печи или топку, называются тяговыми.

Трубы, в которых создается принудительная тяга, предназначенная для эвакуации дымовых газов в верхние слои атмосферы, носят название отводящих. Многие трубы выполняют эти две функции одновременно. Примером могут служить дымовые трубы мартеновских печей в черной металлургии и отражательных печей в цветной металлургии, где применение дымососов невозможно из-за высоких температур отходящих газов, которые настолько запылены и содержат столько вредных, в основном сернистых соединений, что требуют высоты труб 80-120 м. В зависимости от материала дымовые трубы подразделяются на кирпичные, монолитные железобетонные, сборные железобетонные и металлические.

**Расчет напряжений в арматуре.** Для расчета горизонтальных сечений по несущей способности задаются сечением вертикальной арматуры  $f_s$  на 1 м длины окружности трубы и толщиной стенки ствола  $h$  и определяют напряжение в арматуре  $\sigma_s$  и в бетоне  $\sigma_c$  от собственной массы, расчетной ветровой нагрузки или сейсмических сил. Затем проверяют прочность полосы длиной 1 м с наветренной и подветренной сторон ствола на совместное воздействие собственной массы, нормативной ветровой нагрузки и температуры.

Если взять проекцию горизонтального сечения на плоскость  $xz$  (в координатах  $x, y, z$ ), то совместное воздействие силы тяжести  $N$  и ветровой нагрузки  $q_0$  можно представить себе как воздействие силы  $Nl$ , действующей на указанное сечение не по центру, а с эксцентриситетом  $e_{tot}$ , т. е. горизонтальное сечение ствола трубы при воздействии собственной массы и ветровой нагрузки испытывает внецентренное сжатие.

Рассмотрим напряжение, возникающее с наветренной и подветренной сторон трубы, предварительно приняв для упрощения расчета  $r_a = r = (r_{вн} + r_{н})/2$ , идущее в запас прочности сечения. Тогда площадь сжатой зоны бетона.

$$A_{cc} = 2rh\beta,$$

где  $\beta$  - половина угла, ограничивающего сжатую зону сечения.

Площадь всей растянутой арматуры  $A_{s1} = \mu_1 2rh(\pi - \beta)$  и площадь всей сжатой арматуры  $A_{s2} = \mu_1 2rh(\pi - \beta)$ . Расстояние от центра кольца до центров тяжести площадей.

$$Ya = r \sin \beta / (\pi - \beta).$$

Напряжение в арматуре на уровне центра тяжести площади всей растянутой арматуры определяется по формуле.

$$\sigma_s = M_a / W_a,$$

где  $M_a$  - момент всех сил относительно центра тяжести площади сжатой зоны.

$$M_a = Nr(C_0 - \sin \beta / \beta),$$

где  $e_{tot} = M_a/Nr$ -эксцентриситет приложения силы  $N$ ;  $W_a$ -момент сопротивления сечения по растянутой зоне, равный статическому моменту площади растянутой арматуры относительно центра тяжести сжатой зоны:

$$Wa = A_s (Y_s + Y_c) = 2rh \mu (\pi - \beta) (\sin \beta / \pi - \beta + \sin \beta / \beta).$$

Вычисляя напряжение в арматуре с учетом значений  $M_a$  и  $W_a$ , после преобразований получим.

$$\sigma_{sH} = n_0 [C_0 (\beta / \sin \beta) - 1] / \pi \mu_1$$

где  $n_0 = N/2rh$ .

Как следует из формулы, напряжение, возникающее в арматуре от воздействия внешних нагрузок, зависит от силы тяжести ствола трубы  $N$  над рассматриваемым сечением, эксцентриситета приложения этой силы  $e_{tot}$ , угла, разграничивающего сжатую и растянутую зоны сечения  $\beta$ , диаметра ствола в сечении ( $2r$ ), толщины стенки  $h$  и количества продольной арматуры в стволе, характеризуемого коэффициентом  $\mu_1$ . При принятых значениях  $h$  и  $\mu_1$  и напряжение  $\sigma_{sH}$  является функцией  $e_{tot}$  и  $\beta$ .

Угол  $\beta$ , в свою очередь, также зависит от эксцентриситета  $e_{tot}$  и характеристики железобетонного элемента кольцевого сечения с распределенной по высоте арматурой  $s_1$ .

Исходя из этого, напряжения в арматуре при воздействии на сечение ствола ветровой нагрузки и массы ствола могут быть определены методом последовательных приближений: задаваясь  $e_{tot}$ , находим угол и затем, зная изгибающий момент и необходимые величины, определяем  $e_{tot}$ , сравнивая его с ранее принятым.

Характер железобетонного элемента кольцевого сечения определяют по формуле.

$$s_1 = 1.5 \mu_1 n / \omega v_1 \beta_0.$$

Если иметь в виду, что в зоне температур до 200 °С (обычно температура внутренней поверхности ствола не превышает 100 °С)  $\omega v_1 = 0,4$ , а подавляющее большинство труб изготавливают из бетона класса С18/22,5 и арматуры периодического профиля класса А-III и  $n = 6,35$ .

$$s_1 = 23.8 \mu_1 / \beta_0,$$

$$s_1 = 23.8 \mu_1 / \beta_0,$$

здесь  $f_a$  – площадь арматуры;  $h_0$  – расстояние от внутренней поверхности ствола до оси арматуры.

Относительный эксцентриситет  $e_{tot}$  приложения нормальных сил  $N$  определяют по формуле.

$$e_{tot} = M_B + M_{доп} / Nr \geq r_{яора} / r,$$

где  $r = (r_n + r_{BH})/2$ , для неослабленного сечения;

$M_B$  -изгибающий момент, вызванный расчетной ветровой нагрузкой;

$M_{доп}$  -дополнительный изгибающий момент, вызванный собственной массой трубы из-за ее прогиба и крена фундамента;

$N$  – продольная сила, создаваемая массой участка трубы.

На основании многочисленных анализов результатов расчетов кривизны, армированных монолитных железобетонных труб, можно сделать вывод, что с достаточным приближением, идущим в запас прочности, можно принять эпюру кривизны прямоугольной, а в качестве расчетной ординаты принять кривизну нижнего сечения трубы. Из этого следует, что с достаточной степенью точности кривизну трубы можно считать постоянной и определять по кривизне ее нижнего сечения.

В этом случае прогиб цилиндрической трубы  $f$  определяется формулой

$$f = x^2/2y,$$

где  $x$  – расстояние от основания трубы до расчетного сечения.

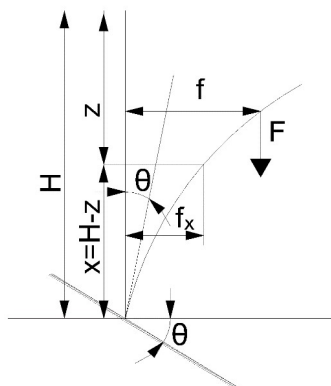


Рис. 1. Расчетная схема прогиба трубы от действия ветровой нагрузки с учетом крена фундамента

Подставив это выражение в формулу, определяющую значение дополнительного момента, произведя интегрирование и преобразования, получим:

$$M_{\text{доп}} = (FZ/6y) (3HZ - 2Z^2).$$

Входящее в это выражение произведение  $FZ$  — масса участка трубы с футеровкой над расчетным сечением, ничто иное, как нормальная сила  $N$  в этом сечении. Исходя из этого, можно записать, что

$$M_{\text{доп}} = NZ^2/6y (3H/Z - 2),$$

где  $Z$  — расстояние от верха трубы до расчетного сечения.

Результат получен, но следует учитывать, что увеличение изгибающего момента на величину  $M_{\text{доп}}$  вызовет возрастание общего прогиба трубы, что повлечет за собой появление нового дополнительного момента  $\Delta M_{\text{доп}}$ , который, естественно, будет значительно меньше определенного ранее  $M_{\text{доп}}$ .

Как показывает анализ расчетов дымовых труб, отношение суммарного дополнительного момента к ветровому моменту в нижнем расчетном их сечении может быть принято равным 0,3, т. е.

$$K = M_{\text{доп}} / M_{\text{в}} = 0,3.$$

На основании сделанных выводов с учетом соответствующих корректив дополнительный момент, вызванный прогибом трубы от ветровой нагрузки, может быть рассчитан по формуле.

$$M_{\text{доп}} = (NZ^2/2y) (3H/Z - 2).$$

Однако дополнительные моменты в трубе могут возникать не только от ее прогиба под действием ветровой нагрузки, но также и от крена фундамента. При возникновении этого явления следует четко представлять его потенциальную опасность и учитывать, что предельно допустимое значение тангенса угла наклона фундамента  $\text{tg}\theta$  не должно превышать 0,004.

Суммарный дополнительный момент с учетом всех факторов определяют по формуле.

$$M_{\text{доп}} = (NZ^2/5y) (3H/Z - 2 + 2,5y \text{tg}\theta/Z).$$

Основные характеристики, требуемые для надзора за высотными дымовыми трубами это максимальное отклонение трубы в верхней точке и период внутренних и внешних колебаний

Инклинометры широко применяются, к примеру, на сельскохозяйственных или строительных машинах, для контроля деформаций опор, балок различных сооружений и т. д. В зависимости от числа

осей, относительно которых может измеряться угол наклона, инклинометры могут быть одно-, двух- или трехосевые. Датчики угла наклона широко используются в системах позиционирования на производстве, контроля углов наклона тяжелых машин, в строительстве и т.д. Инклинометр в качестве выходной функции может иметь нормированный аналоговый выход (пропорциональный углу наклона), дискретный пороговый выход (задаваемый кнопками на корпусе) или же иметь цифровой CAN-интерфейс (что очень актуально для применений на подвижной технике). Изучены одно-, двух- и трехосевые инклинометры. Инклинометры данных производителей могут применяться как на производстве обладают прочными корпусами с максимальной степенью пылевлагозащиты и имеют широкий набор выходных сигналов для различных диапазонов измерения. Мониторинг собственной частоты колебаний и логарифмического декремента затуханий.

Для выявления изменений напряженно-деформированного состояния конструкций уже достаточно давно и особенно в последние 10-15 лет используются динамические методы зондирования зданий и сооружений, основанные на измерении периодов и логарифмических декрементов собственных колебаний зданий и сооружений.

Колебания зданий и мостовых сооружений могут возникать вследствие воздействия проводимых рядом строительных работ, движения различного транспорта или другими техногенными факторами. В связи с этим для высотных зданий возникает необходимость выявления изменений напряженно-деформированного состояния конструкций и локализации мест такого изменения с использованием других методов, позволяющих автоматизировать процесс измерений. Подсистема «Мониторинга собственной частоты колебаний и логарифмического декремента» позволяет в автоматизированном режиме сигнализировать о превышении допустимого уровня напряженно-деформированного состояния для предупреждения аварийно-опасных случаев.