



УДК 539.3:624.014:620.169.1

Ф.Г. Ахмадиев, И.Н. Гатауллин, Х.Г. Киямов, Н.М. Якупов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРАДИРНИ

Введение. Градирия - это устройство для охлаждения воды атмосферным воздухом в системах оборотного водоснабжения промышленных предприятий и устройствах кондиционирования воздуха. Элементы строительных конструкций градирен нефтеперерабатывающей отрасли эксплуатируются в условиях воздействия силовых нагрузок, а также агрессивных сред, включающих общезаводскую атмосферу и среду, вызванную технологическим процессом производства. Тяжелые условия эксплуатации и время делают свое дело. Разрушается лакокрасочное покрытие конструкций, что приводит к интенсивному коррозионному износу. При этом возрастают напряжения в элементах конструкций, что приводит, в свою очередь, к увеличению коррозионной активности. В конечном итоге, эти факторы приводят к значительному уменьшению несущей способности и сокращению срока службы строительных конструкций градирен. В связи с этим, вопросы прогнозирования долговечности конструкций остаются актуальными.

Описание элементов конструкций градирни. Вентиляторные градирни СК-1200 представляют собой смешанную конструкцию из железобетона и металлических конструкций. Наклонные стойки и цилиндрическая часть градирни выполнены из железобетона. На железобетонное кольцо цилиндрической части опирается металлическая часть градирни (конфузор, горловина и диффузор), состоящая из фрагментов последовательно соединенных конической, тороидальной, цилиндрической и конической подкрепленных оболочек. Панели, сваренные из стальных прокатных листов, соединяются между собой фланцами на болтах. В качестве ребер жесткости, подкрепляющих элементов и элементов шпангоутов используются стандартные швеллеры и уголки, а также прокатные листы. В зонах стыка конфузора и горловины (уровень 21.100 м) и в верхней части диффузора (уровень 32.000 м) имеются формообразующие шпангоуты ферменной конструкции. Шпангоуты опираются системой растяжек на продольные подкрепляющие элементы корпуса градирни. На уровне 21 м металлический корпус восьмью стяжками крепится к шахте вентилятора. В градирне имеются технологические окна различных размеров, а также площадки и лестничная система для обслуживания. В этих зонах установлены подкрепляющие элементы, которые усиливают конструкцию.

Состояние металлической части градирни. Металлическая часть градирни имеет различную степень коррозионного износа. Лакокрасочное покрытие по

всей поверхности пришло в негодность, происходит активный коррозионный износ элементов конструкций. Наиболее интенсивному коррозионному износу подвержена часть металлической оболочки, которая регулярно увлажняется технологической водой, содержащей твердые частицы пыли и растворенные коррозионно-активные примеси [1]. Активный коррозионный износ происходит в местах соединения панелей, в узких зазорах между элементами панелей и над ребрами жесткости. Многие панели вследствие интенсивного коррозионного износа превратились в "решето" - имеется большое количество отверстий. Такая картина наблюдается в зоне горловины, в нижней зоне конфузора и диффузора. В местах соединения панелей между собой и по всему периметру в районе крепления панелей к железобетонной части градирни имеется значительный коррозионный износ.

Для ряда точек проведены замеры толщины обечайки и ряда подкрепляющих элементов панелей. В результате интенсивного коррозионного износа, толщина обечайки значительно уменьшилась. Так, в зоне горловины толщина уменьшилась до 50%. Подкрепляющие элементы имеют меньший износ (в среднем до 30%), поскольку они расположены снаружи градирни.

Методика прогнозирования коррозионного износа металлических конструкций, работающих в агрессивных средах. Исследуется влияние коррозионного износа на напряженно-деформированное состояние (НДС) металлических конструкций градирни, не защищенных лакокрасочными покрытиями.

Алгоритм учета коррозионного износа:

1. Определяется исходное НДС градирни, т.е. при $t_i=0$, где t - время (в годах) после запуска градирни в работу.

2. Открывается цикл по времени: $t_{i+1}=t_i+A$ года. Вычисляется глубина коррозии металлических конструкций по текущему времени t и вычисленному НДС по формуле:

$$\delta(t_{i+1}) = \delta_{ky} t_{i+1}^2 (1 + k \sigma_i) / (T_2^2 + T_1 t_{i+1} + t_{i+1}^2),$$

где σ_i - интенсивность напряжения, t_i - время в годах на i -ом цикле, k - коэффициент влияния напряжения на коррозионный износ, T_1 - коэффициент затухания коррозионного износа, T_2 - коэффициент инерции коррозии металла в данной среде, δ_{ky} - установившееся значение глубины коррозии, A - шаг по времени. В расчетах были приняты следующие значения параметров: $A=2,5$; $T_1=0,666г$; $T_2=0,334г$; $\delta_{ky}=0,17см$; значения коэффициентов k приведены в таблице 1. Вычисление $\delta(t_{i+1})$ производится в узловых значениях расчетной сетки.



Таблица 1

k (МПа ⁻¹)	0.002	0.002	0.003	0.005
σ _i (МПа)	50	100	150	200

3. Вычисляются геометрические параметры градирни с учетом коррозионного износа d(t) во всех расчетных точках:

$$h_{i+1} = h_i - \delta(t_{i+1}), F_{i+1} = F_i - \Delta F(t_{i+1}), S_{i+1} = S_i - \Delta S(t_{i+1}),$$

$$J_{i+1} = J_i - \Delta J(t_{i+1}),$$

где h_i - толщина оболочек в расчетных точках; F_i, S_i, J_i - жесткостные параметры ребер на i-ом цикле. На данном этапе возможна корректировка и других параметров. Если при пересчете толщины найдется хотя бы одна h_{i+1} < 0, то расчет завершается.

4. Переход на следующий шаг цикла для вычисления НДС градирни с использованием полученных данных.

Для анализа НДС использовался сплайновый вариант метода конечных элементов, представляющий собой синтез идеи параметризации и метода конечных элементов [2].

Рассматриваемая металлическая часть градирни Ω параметризуется координатами t¹, t² единичного квадрата. Построив сетку на Ω и зная значения радиуса-вектора в узлах сетки, уравнение для радиуса-вектора записываем в виде $\bar{r} = \bar{r}(t^1, t^2)$.

Определяются координатные векторы, вектор единичной нормали, компоненты метрических тензоров и символы Кристоффеля.

Параметрическое уравнение в цилиндрической системе координат, использованное при расчете градирни, имеет вид:

$$\bar{r}(t^1, t^2) = x(t^1, t^2) \bar{i} + \rho(t^1, t^2) \bar{e}_1(t^1, t^2),$$

$$\bar{e}_1 = \sin \psi(t^1, t^2) \bar{j} + \cos \psi(t^1, t^2) \bar{k},$$

$$\bar{e}_2 = \cos \psi(t^1, t^2) \bar{j} - \sin \psi(t^1, t^2) \bar{k},$$

где x(t¹, t²) - линейные координаты; ψ(t¹, t²) - угловые координаты; ρ(t¹, t²) - кратчайшее расстояние до некоторой точки σ от оси ОХ; $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ - единичные векторы прямоугольных осей ОХ, ОУ, ОZ.

Для вывода разрешающих уравнений используется вариационное уравнение Лагранжа

$$\delta W - \delta A = 0,$$

где δW - вариация потенциальной энергии деформации оболочки, δA - вариация работ внешних сил, действующих на оболочку.

Вектор перемещений представляется в виде

$$\bar{U} = u \bar{i} + v \bar{e}_2 + w \bar{e}_1.$$

Решение (u, v, w) в каждом элементе представляется в виде интерполяционного эрмитового кубического сплайна двух переменных

$$u = \varphi(s^1) F_u \varphi(s^2), v = \varphi(s^1) F_v \varphi(s^2), w = \varphi(s^1) F_w \varphi(s^2),$$

где φ(s¹), φ(s²) - векторы координатных функций F_u, F_v; F_w - матрицы узловых значений компонент перемещений, первых и вторых смешанных производных.

Подставляя вариации перемещений и деформаций в вариационные уравнения Лагранжа и учитывая не-

зависимость узловых перемещений и их производных, после ряда преобразований задача сводится к системе алгебраических уравнений

$$[A] [U] = [R].$$

Здесь [U] - вектор неизвестных; [R] - вектор нагрузки и нелинейных составляющих; [A] - симметричная матрица жесткости системы ленточной структуры.

Результаты расчета. На конструкцию действуют ветровая и весовая, а также локальная вакуумная нагрузки в зоне лопастей вентилятора. Согласно проекту, при аэродинамическом коэффициенте C = 1 ветровая нагрузка изменяется по высоте. До уровня 21 м она принята 3·10⁻⁴ МПа, выше - 8,2·10⁻⁴ МПа. Изменение нагрузки по окружной координате задается согласно СНиП 2.01.07-85 по схеме 12б. Вакуумная нагрузка возникает в эксплуатационный период внутри градирни при работе вентилятора и составляет 1,8·10⁻⁴ МПа.

С учётом наличия плоскости симметрии, рассмотрена половина конструкции. При расчетах рассматривалось 10 элементов по окружной координате и 24 элемента - по образующей. Предполагалось, что конструкция шарнирно закреплена в плоскости контакта с железобетонной частью. Продольные и поперечные подкрепляющие элементы (стрингеры и шпангоуты) моделировались ребрами жесткости с учетом эксцентриситета. Вес шпангоутов передается на оболочку через раскосы, поэтому в зонах контакта раскосов с продольными элементами обечайки прикладывались сосредоточенные нагрузки.

В таблице 2 приведены изменения максимальных интенсивностей напряжений σ_i (МПа) по годам для некоторых характерных точек.

Таблица 2

t\ψ	0	π/5	2π/5	3π/5	4π/5	π
t=0	10	40	60	35	20	17
t=2.5	15	60	110	58	35	26
t=5.0	20	100	240	120	82	69

При t = 7.5 лет расчет завершается. Так как вычисления проводились при весьма жестких условиях (максимум σ_i на каждом уровне при расчете коррозии, без учета защитных покрытий), то результат функционирования градирни всего 7.5 лет вполне реален.

Характер изменения прогибов и интенсивностей напряжений по образующей градирни для ψ = 27° приведен на рис. 1, 2, соответственно. На рис. 3, 4 приведены изменения прогибов и интенсивностей напряжений по окружной координате для зоны стыка торoidalной и цилиндрической частей (∅ - исходное состояние; - через 2,5 года; Δ - через 5 лет).

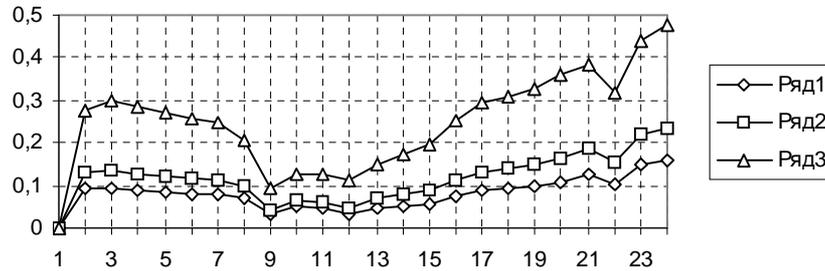


Рис. 1. Характер изменения прогибов по образующей градирни для $\psi=27^0$ (\diamond - исходное состояние; - через 2,5 года; Δ - через 5 лет)

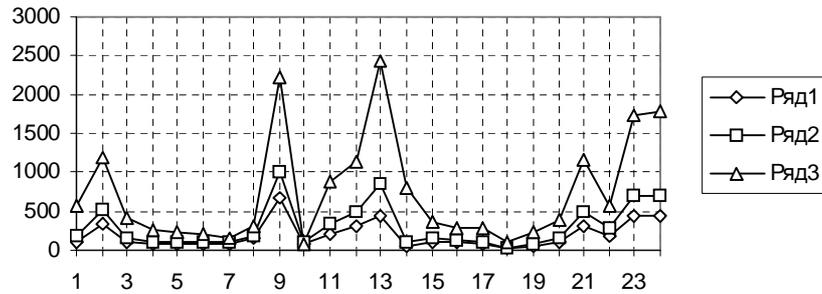


Рис. 2. Характер изменения интенсивностей напряжений по образующей градирни для $\psi=27^0$ (\diamond - исходное состояние; - через 2,5 года; Δ - через 5 лет)

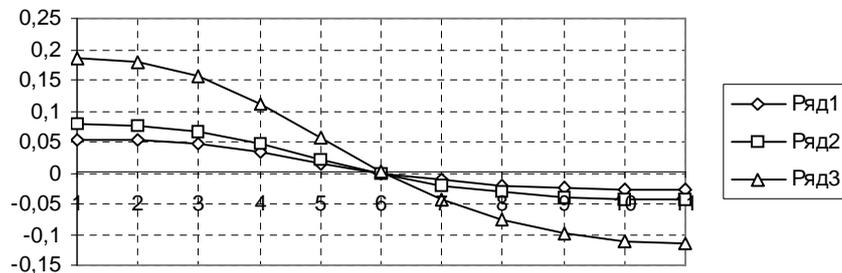


Рис. 3. Изменения прогибов по окружной координате для зоны стыка тороидальной и цилиндрической частей (\diamond - исходное состояние; - через 2,5 года; Δ - через 5 лет)

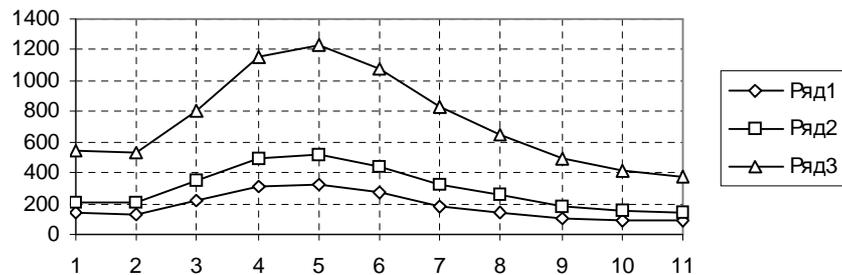


Рис. 4. Изменения интенсивностей напряжений по окружной координате для зоны стыка тороидальной и цилиндрической частей (\diamond - исходное состояние; - через 2,5 года; Δ - через 5 лет)

Выводы

1. Максимальные прогибы наблюдаются на верхнем срезе градирни и несколько ниже - в средней зоне конфузора.
2. Максимальные напряжения возникают в зоне горловины, несколько ниже - в нижней зоне конфузора и верхней части диффузора.
3. С увеличением срока эксплуатации (с увеличением коррозионного износа), рост напряжений и прогибов в зонах максимальных величин идет по нарастающей.

Коррозионный износ конструкций (утончение элементов конструкции) приводит к существенному росту напряжений и прогибов.

Литература

1. Якупов Н.М., Гатауллин И.Н., Хисматуллин Р.Н. Обследование, анализ и прогнозирование долговечности строительных конструкций и рекомендации по их восстановлению. Методическое руководство. - Казань: ИММ РАН, 1996. 208 с.