

УДК 681.3.06:624.012.45.04

**А. С. ВОЛКОВ, Д. Р. ПРОКОПЕНКО, Д. О. МОЗГОВОЙ, Д. А. ЖУЛЬ**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»**ИССЛЕДОВАНИЕ НДС КОНСТРУКЦИЙ БАШЕННОЙ ГРАДИРНИ  
ВЫСОТОЙ  $H = 150$  М С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО РЕЖИМА  
РАБОТЫ**

**Аннотация.** Представлены результаты анализа сопоставительных расчетов оболочки железобетонной башенной градирни  $H=150$  м Зуевской ТЭС с учетом действительных режимов эксплуатации при совместном воздействии силовых и температурных воздействий. Выявлено влияние солнечной радиации и других воздействий на напряжения в вертикальных и горизонтальных сечениях по высоте сооружения. Выполнена оценка степени влияния различных факторов на прочность и надежность оболочки башенной градирни.

**Ключевые слова:** башенная градирня, прочность, деформации, технологические режимы работы, солнечная радиация, несущая способность, надежность.

Башенные железобетонные градирни относятся к сооружениям повышенной категории ответственности и работают в условиях сложного НДС при совместном воздействии силовых и температурно-влажностных воздействий [1, 2, 13]. При этом действительные режимы работы сооружений по результатам длительных наблюдений [4, 5], в том числе с учетом климатических воздействий для данных сооружений с учетом длительного периода эксплуатации существенно влияют на их НДС и требуют их учета при оценке несущей способности для установления безопасной работы в составе комплекса ТЭС. Нормативные методики расчёта башенных сооружений подобного типа, основанные на расчёте по допускаемым напряжениям, давно устарели и не позволяют достоверно оценить их НДС с учетом действительных режимов эксплуатации [1, 2, 13]. В настоящее время широко применяются программные комплексы, основанные на МКЭ, которые позволяют учесть и проанализировать рассматриваемые влияния комплекса факторов [4, 7, 8, 12].

Целью данных теоретических исследований является выполнение анализа напряжённо-деформированного состояния оболочки башенной градирни № 2 Зуевской ТЭС высотой 150 м с учётом проектных и действительных технологических режимов работы и климатических воздействий.

В качестве объекта исследований рассматриваются конструкции оболочки башенной железобетонной градирни № 2 Зуевской ТЭС высотой 150 метров, построенной в 1993 г. Максимальный диаметр оболочки в уровне нижнего опорного кольца – 117,5 м, диаметр в верхней части на отм. +150,0 м – 74,7 м. Толщина оболочки по высоте переменная от 1 170 мм в уровне кольца до 160 мм. Башня опирается на опорный железобетонный контур, опертый на 44 пары сборных железобетонных колонн-раскосов 900 мм. В верхней части выполнено кольцо жесткости толщиной 200 мм. Оболочка вытяжной башни выполнена из бетона марки по прочности на сжатие М400 (В30). Армирование железобетонной башенной градирни выполнено двухрядным. Коэффициент армирования составляет: в меридиональном направлении  $\mu = 0,010 \div 0,020$ , а в кольцевом  $\mu = 0,015 \div 0,018$ .

Наблюдения за оболочкой сооружения выполнялись специалистами СНПЦ СВИС при ДонНАСА в период с 1999 г. по 2009 г и нашли отражение в публикациях [4, 5, 6]. По результатам данных исследований определены основные закономерности изменения исследуемых параметров в разные периоды года. Выявлено, что односторонний солнечный нагрев оказывает существенное влияние на распределение температуры по периметру сооружения в верхней части. Температурный перепад между нагреваемой солнцем и теневой сторонами по толщине оболочки составил в среднем 5 °С, а



**Рисунок 1** – Пространственная расчетная схема оболочки башенной градирни  $H = 150$  м (111 387 – узлов, 110 680 – элементов).

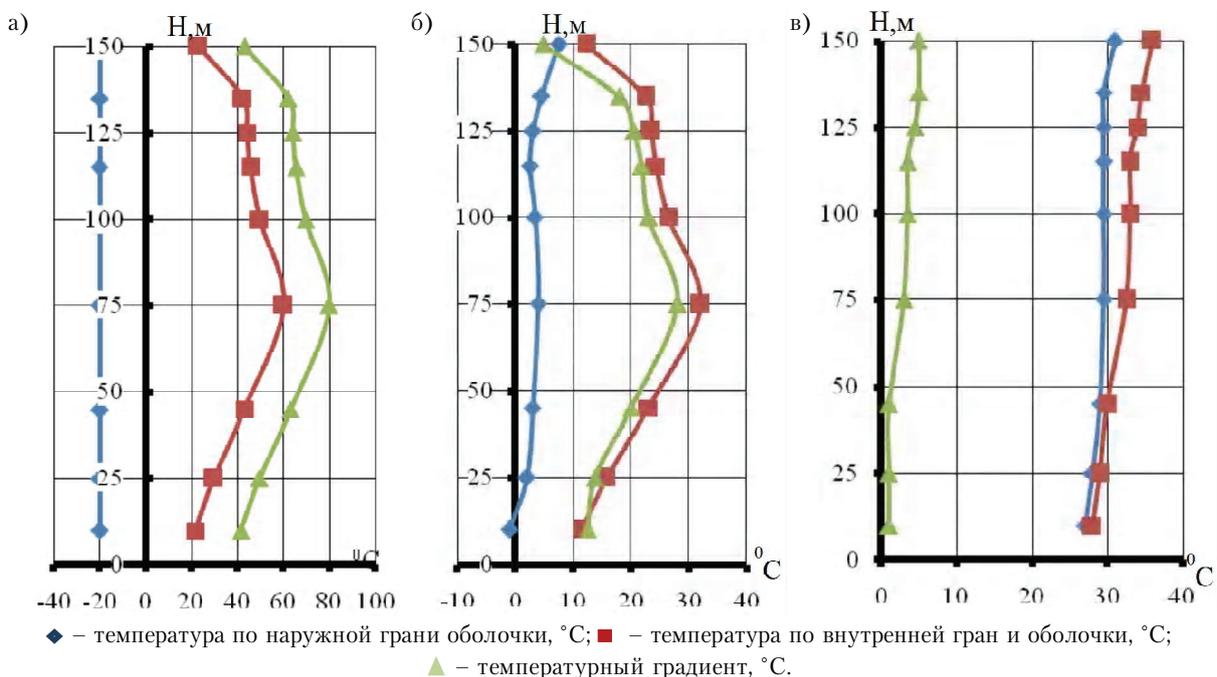
максимальный перепад температур нагрева солнечной и теневой сторон по периметру оболочки на уровне верхнего обреза достигал  $8^\circ\text{C}$ .

Для расчета сооружения была построена пространственная расчетная схема оболочки башенной градирни в ПК «LIRA-САПР 2017» согласно данным геометрической характеристики исходного рабочего проекта и результатов обследования. По периметру в одном плоском горизонтальном сечении оболочка разделена на 60 элементов с шагом по окружности 60, по высоте сооружение разбито с шагом 500 мм (рис. 1).

На основании проектных и экспериментально-полученных данных сформированы три технологических режима работы сооружения: «Зимний режим-проект», «Летний режим» и «Зимний режим» (рис. 2). Также сформирована схема распределения температурных перепадов при одностороннем солнечном нагреве (рис. 3).

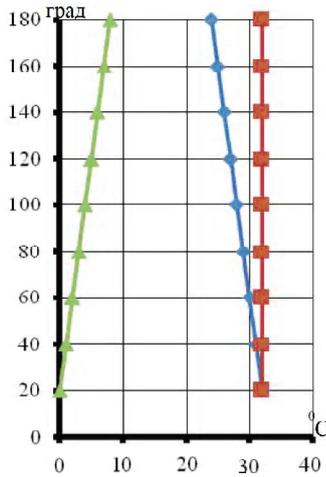
При расчете сооружения учитывались следующие нагрузки и воздействия, предусмотренные рабочим проектом, а также температурные воздействия согласно результатам исследований: собственный вес строительных конструкций (П), полезные нагрузки на технологические площадки (К), снеговая нагрузка на технологические площадки (К), ветровые нагрузки (К), технологические нагрузки (температурный нагрев в зимний и период согласно натурным исследованиям, а также температурный нагрев в зимний период согласно рабочего проекта) [5, 6], воздействие солнечной радиации [5, 6].

а также температурный нагрев в зимний период согласно рабочего проекта) [5, 6], воздействие солнечной радиации [5, 6].



**Рисунок 2** – Графики распределения температур по высоте оболочки сооружения для режимов: проектного «зимний режим-проект» (а), по экспериментальным данным для «зимнего режима» (б) и «летнего режима» (в).

Программа исследований включала: 1 – модальный анализ; 2 – расчет ствола согласно данным исходного проекта; 3 – то же с учетом работы с 1-м газоходом; 4 – расчет с учетом работы с 1-м газоходом и начальным креном (126,3 мм); 5 – расчет с учетом работы с 1-м газоходом, начальным креном и воздействием солнечной радиации.



**Рисунок 3** – График распределения температур по окружности оболочки сооружения от воздействия солнечной радиации. Условные обозначения с рис. 2.

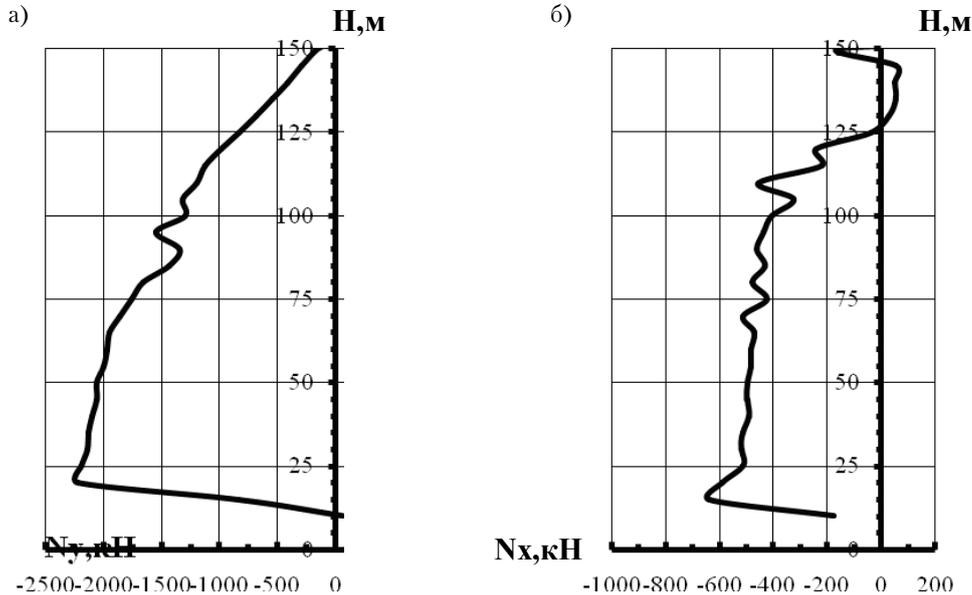
Из результатов динамического расчёта получены данные о периодах и частотах собственных колебаний оболочки, представленных в таблице. Учитываем первые восемь форм колебаний, т. к. предельное значение

**Таблица** – Периоды и частоты собственных колебаний оболочки башенной градирни

№ формы	Собст. значения	Частоты		Период (с)
		Круг. частота (рад/с)	Частота (Гц)	
1	0,184	5,436	0,865	1,156
2	0,184	5,437	0,865	1,156
3	0,181	5,523	0,879	1,138
4	0,181	5,524	0,879	1,137
5	0,162	6,174	0,983	1,018
6	0,162	6,177	0,983	1,017
7	0,146	6,830	1,087	0,920
8	0,146	6,830	1,087	0,920
9	0,144	6,949	<b>1,106</b>	0,904
10	0,144	6,950	<b>1,106</b>	0,904

ние частоты собственных колебаний для сооружения подобного типа не должно превышать 1,1 Гц [1]. Кроме этого сооружение имеет сложные формы колебаний из-за больших размеров в плане и криволинейности оболочки.

Значения продольных сил N от собственного веса не превышают для вертикальных сжимающих напряжений  $N_y = -2\ 225$  кН и горизонтальных  $N_x = -638...+58$  кН (рис. 4). При этом они составляют не более 95 % для  $N_y$  и 7 % для  $N_x$  от суммарных напряжений.



**Рисунок 4** – Графики изменения напряжений в горизонтальных и вертикальных сечениях от собственного веса сооружения:  $N_y$  (а) и  $N_x$  (б).

От действия ветровых нагрузок возникают растягивающие вертикальные  $N_y$  напряжения, которые достигают для наветренной и подветренной граней оболочки 2 685 и 913 кН соответственно, а горизонтальные напряжения составляют 311,5...-356 кН (рис. 5).

Воздействие технологической среды при режиме «Зимний режим» приводит к возникновению сложного напряженного состояния в оболочке. Величины горизонтальных напряжений достигают  $N_x = 935$  кН (рис. 6).

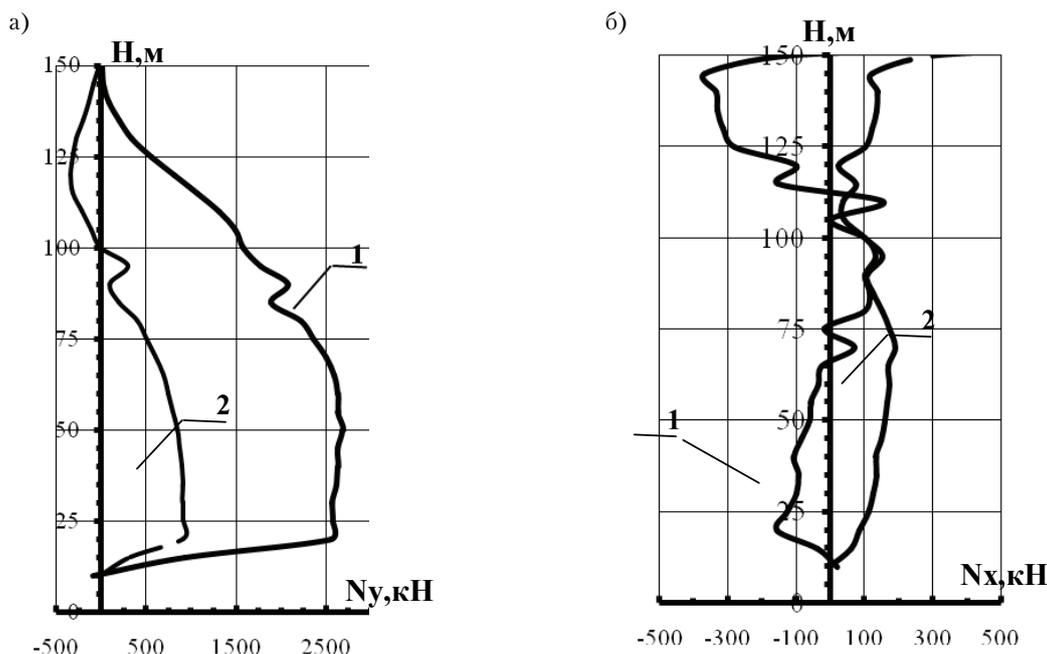


Рисунок 5 – Графики изменения напряжений в горизонтальных и вертикальных сечениях от ветровых нагрузок с наветренной (1) и подветренной (2) сторон:  $N_y$  (а) и  $N_x$  (б).

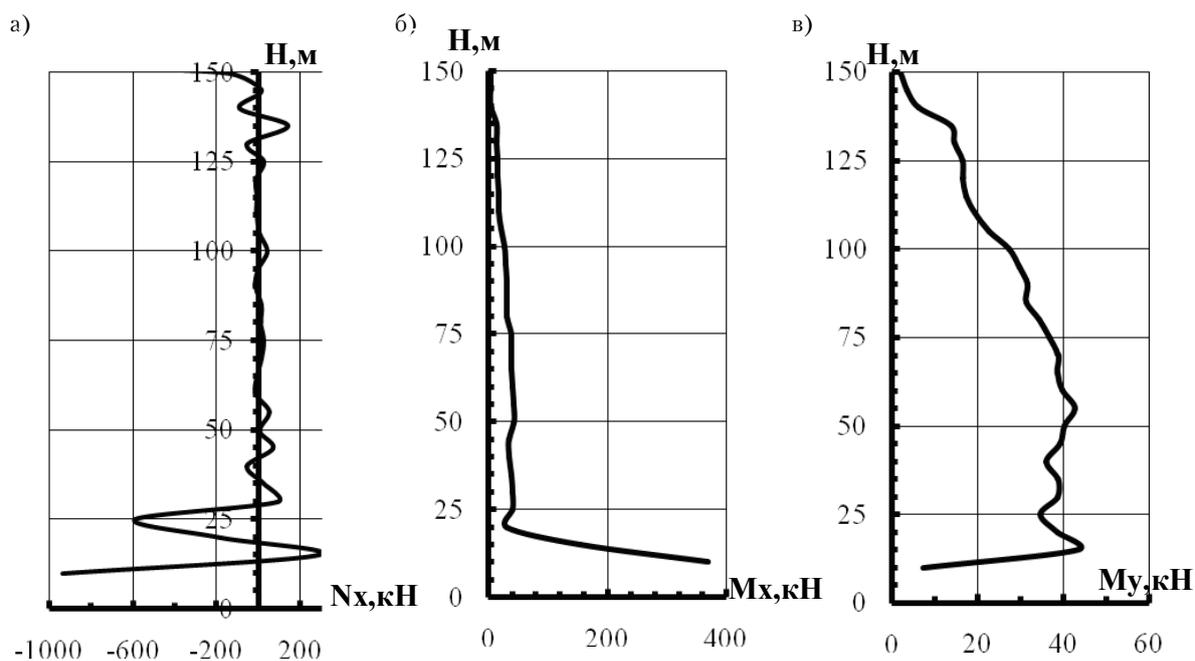


Рисунок 6 – Графики изменения напряжений в горизонтальных и вертикальных сечениях оболочки от технологической нагрузки при режиме «Зимний режим»:  $N_x$  (а),  $M_x$  (б),  $M_y$  (в).

Величины вертикальных напряжений при режиме «Летний режим» достигают  $N_y = 632$  кН, а горизонтальных напряжений –  $N_x = 1\,009...-2\,455$  кН в месте сопряжения с опорным контуром (рис. 7).

Величины вертикальных напряжений при режиме «Зимний режим – проект» достигают  $N_y = 356$  кН, а горизонтальных напряжений –  $N_x = 1\,875...-6\,995$  кН в месте сопряжения с опорным контуром (рис. 8).

Воздействие солнечной радиации при неравномерном распределении температурного градиента приводит к возникновению сложного напряженного состояния со знакопеременными полями напряжений как в горизонтальных, так и в вертикальных сечениях оболочки. Величины вертикальных напряжений достигают  $N_y = 475...-561$  кН, а горизонтальных напряжений –  $N_x = 811...-2\,900$  кН (рис. 9).

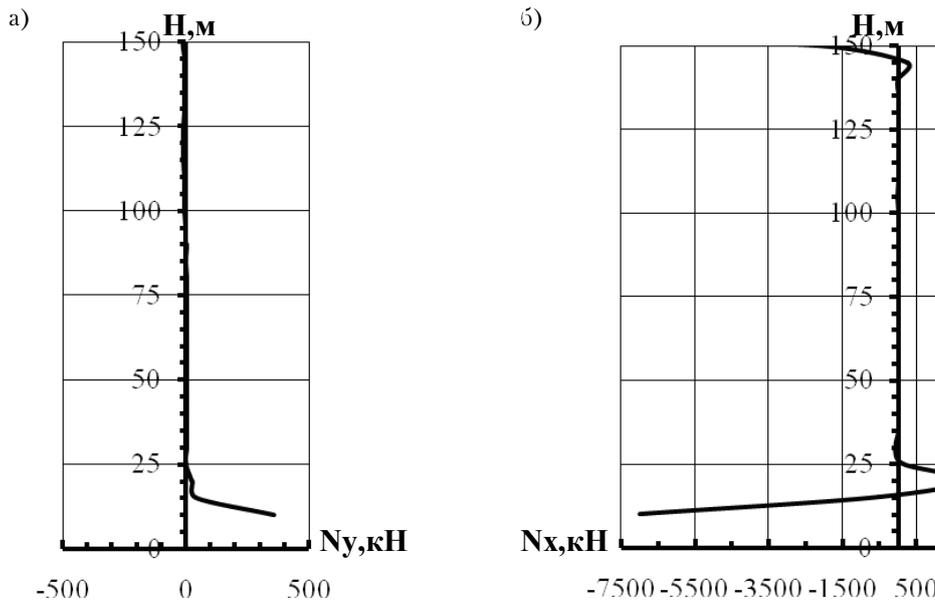


Рисунок 7 – Графики изменения напряжений в горизонтальных и вертикальных сечениях оболочки от технологической нагрузки при режиме «Лето»:  $N_x$  (а), и  $M_x$  (б),  $M_x$  (в),  $M_y$  (г).

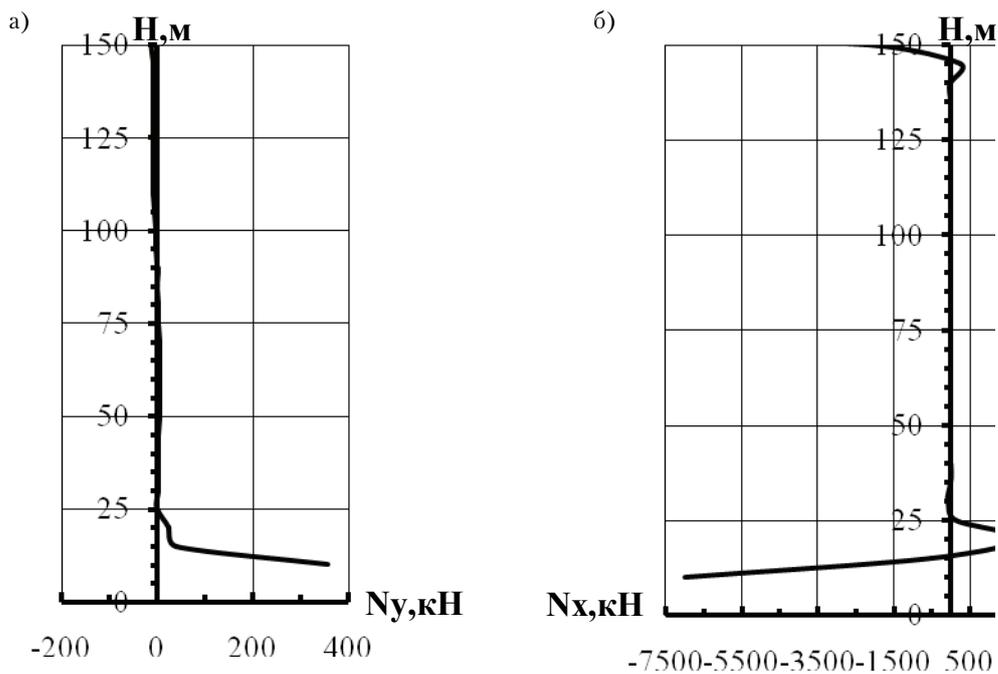
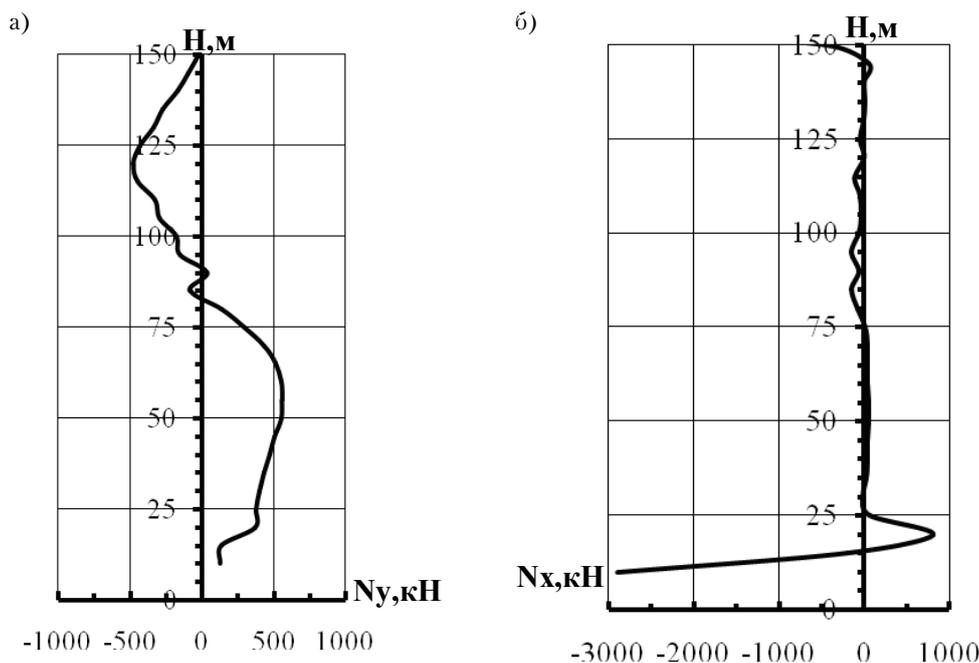


Рисунок 8 – Графики изменения напряжений в горизонтальных и вертикальных сечениях оболочки от технологической нагрузки при режиме «Зимний режим – проект»:  $N_x$  (а), и  $N_y$  (б).

Напряжения от суммарных нагрузок (воздействий) при совместном воздействии технологического режима «Зимний режим» и солнечной радиации по наветренной и подветренной сторонам оболочки (РСН 7) составляют: вертикальные напряжения достигают  $N_y = 1\,210...-1\,410$  кН, а горизонтальные напряжения –  $N_x = 337...-3\,990$  кН в месте сопряжения с опорным контуром, изгибающие моменты от температурного градиента достигают  $M_x = 3,6...-380$  кНм и  $M_y = 47,9...-35,8$  кНм.

Напряжения от суммарных нагрузок (воздействий) при совместном воздействии технологического режима «Летний режим» и солнечной радиации по наветренной и подветренной сторонам оболочки (РСН 8) составляют: вертикальные напряжения достигают  $N_y = 1\,391...-1\,400$  кН, а горизонтальные



**Рисунок 9** – Графики изменения напряжений в горизонтальных и вертикальных сечениях оболочки при воздействии солнечной радиации:  $N_x$  (а), и  $N_y$  (б).

напряжения –  $N_x = 671...-5\,510$  кН в месте сопряжения с опорным контуром, изгибающие моменты от температурного градиента достигают  $M_x = 9,9...-61$  кНм и  $M_y = 26,2...-156$  кНм.

Напряжения от суммарных нагрузок (воздействий) при совместном воздействии технологического режима «*Зимний режим – проект*» и солнечной радиации по наветренной и подветренной сторонам оболочки (РСН 9) составляют: вертикальные напряжения достигают  $N_y = 1\,214...-1\,385$  кН, а горизонтальные напряжения –  $N_x = 1\,939...-10\,010$  кН в месте сопряжения с опорным контуром, изгибающие моменты от температурного градиента достигают  $M_x = 8,4...-143,2$  кНм и  $M_y = 9,2...-302,2$  кНм.

Анализ полученных данных НДС оболочки позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Согласно результатам расчета получены напряжения в сечениях оболочки градирни от отдельных нагрузок, а также выявлена степень их влияния на НДС сооружения:

- вертикальные сжимающие напряжения от собственного веса сооружения составляют не более 12,7 % от прочности бетона на осевое сжатие и 95 % от суммарных;

- напряжения от воздействия ветра являются одной из определяющих нагрузок с уровнем вертикальных растягивающих напряжений до 60 и до 7 % для горизонтальных напряжений;

- при «*зимнем режиме*» горизонтальные сжимающие напряжения составляют не более 23,4 % от суммарных;

- при «*летнем режиме*» вертикальные растягивающие, а также горизонтальные сжимающие напряжения составили до 45 % от суммарных;

- наиболее жестким режимом эксплуатации является «*зимний режим-проект*» при котором вертикальные растягивающие напряжения достигают 21 %, а горизонтальные сжимающие до 70 % от суммарных;

- от солнечной радиации возникают знакопеременные вертикальные напряжения, составляющие до 30...40 %, а также горизонтальные сжимающие до 29...70 % от суммарных.

2. Результаты расчета по 1-й и 2-й группам п. с. [3] свидетельствуют, что несущая способность элементов оболочки при совместном действии расчетных нагрузок для действительных технологических режимов обеспечена с процентом использования 72 и 96 % соответственно (РСН 7, 8). Несущая способность при совместном действии «*зимний режим-проект*» и солнечной радиации (РСН 9) не обеспечена с процентом использования для вертикальных сечений до 168 % (образуются трещины, что не допускается для данного типа сооружений).

3. Проектный технологический режим эксплуатации сооружения является наиболее жестким, а напряжения при данном режиме в 2,5–6,0 раз превышают соответствующие значения при эксплуатационных режимах.

4. Выявлено, что неравномерный нагрев от солнечной радиации существенно влияет на НДС сооружения, это свидетельствует о необходимости учета данного воздействия при их расчете, что не учитывалось при их проектировании ранее.

5. Для более достоверной оценки НДС сооружения необходимо выполнить уточнение величин напряжений от температурных воздействий с учетом физической нелинейности материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84) [Текст]. – Введ. 1985-03-20 / ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. – М.: Госстройиздат, 1985. – 133 с.
2. Амбарцумян, С. А. Общая теория анизотропных оболочек [Текст] / С. А. Амбарцумян. – М.: Наука, 1974. – 448 с.
3. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Текст]: актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – Введ. 2013-01-01 / Госстрой РФ. – М.: ЦИТП Госстроя РФ, 2016. – 164 с.
4. Корсун, В. И. Особенности напряженно-деформированного состояния железобетонных оболочек градирен [Текст] / В. И. Корсун // Вестник ДонНАСА. – 2002. – Вып. 2002-3(34). – С. 32.
5. Корсун, В. И. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов железобетонных сооружений при силовых и температурных воздействиях [Текст] / В. И. Корсун // Вестник ДонНАСА. – 2000. – Вып. 2000-1(21). – С. 99–107.
6. Особенности повреждений и опыт ремонта железобетонных оболочек градирен высотой  $H = 150$  м [Текст] / В. И. Корсун, Ю. Ю. Калмиков, А. В. Корсун, Е. А. Дмитренко // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2005. – Вип. 2005-8(56) Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – С. 200–203.
7. Корсун, В. И. Развитие методов расчета железобетонных башенных сооружений на термосиловые воздействия [Текст] / В. И. Корсун // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2001. – Вип. 136–2001-5: Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – С. 91–94.
8. Исследование напряженно-деформированного состояния трехсекционной железобетонной градирни [Текст] / В. И. Корсун, Л. В. Стебляко, А. В. Корсун // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2003. – Вып. 2003-2(39) Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Т. 2. – С. 113–118.
9. Determination of the Critical Duration of the First Heating of Heavy Concrete by the Criterion of the Maximum Strength Reduction [Text] / V. Korsun, A. Korsun, S. Mashtaler // Applied Mechanics and Materials, 2015 Trans Tech Publications, Switzerland, Vols. 725–726. – PP. 566–571. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.scientific.net/AMM.725-726.566>.
10. Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  [Text] / V. Korsun, A. Korsun, A. Volkov // MATEC Web of Conferences 6, Concrete Spalling due to Fire Exposure, 07002. – Related Research. – 2013. – № 6. – P. 1–8. – [Electronic resource]. – Access mode: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20130607002>.
11. Кричевский, А. П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия [Текст] / А. П. Кричевский. – М.: Стройиздат, 1984. – 148 с.
12. Оценка эффективности применения высокопрочного сталефибробетона при возведении конструкций машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [Текст] / А. С. Волков, С. Н. Машталер, Д. О. Мозговой, Д. Р. Прокопенко и др. // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 45–55.
13. Лаптев, А. Г. Устройство и расчет промышленных градирен [Текст]: монография / А. Г. Лаптев, И. А. Ведьгаева. – Казань: КГЭУ, 2004. – 180 с.

Получено 19.04.2019

#### А. С. ВОЛКОВ, Д. Р. ПРОКОПЕНКО, Д. О. МОЗГОВИЙ, Д. А. ЖУЛЬ ДОСЛІДЖЕННЯ НДС КОНСТРУКЦІЙ БАШТОВОЇ ГРАДИРНІ ВИСОТОЮ $H = 150$ М З УРАХУВАННЯМ ДІЙСНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Представлені результати аналізу порівняльних розрахунків оболонки залізобетонної баштової градирні  $H = 150$  м Зуївської ТЕС з урахуванням дійсних експлуатаційних режимів при спільній дії силових і температурних впливів. Виявлено вплив сонячної радіації та інших впливів на напруження у вертикальних і горизонтальних перерізах по висоті споруди. Виконана оцінка ступеня впливу різних факторів на міцність і надійність оболонки баштової градирні.

**Ключові слова:** баштова градирня, міцність, деформації, технологічні режими роботи, сонячна радіація, несуча здатність, надійність.

ANDREI VOLKOV, DANA PROKOPENKO, DENIS MOZGOVOI, DANIL ZHUL  
RESEARCH OF THE VAT STRUCTURES OF COOLING TOWER HEIGHT OF  
150 M WITH THE FEATURES OF VALID SCHEMES OF WORK

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The results of the comparative analysis of calculations of a shell of reinforced concrete cooling tower  $H = 150$  m Zuevskaya TPP taking into account the actual technological schemes of work under the combined effect of power and temperature effects. The influence of solar radiation and other influences on the stresses in the vertical and horizontal sections of the height of the structure was revealed. The degree of influence of various factors on the strength and reliability of the cooling tower shell is estimated.

**Key words:** cooling tower, strength, deformation, technological modes of operation, solar radiation, bearing capacity, reliability.

**Волков Андрей Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных конструкций ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование прочностных и деформативных свойств конструкций их модифицированного высокопрочного бетона, оценка технического состояния и проектирование железобетонных конструкций.

**Прокопенко Дана Романовна** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: Оценка технического состояния и проектирование железобетонных конструкций

**Мозговой Денис Олегович** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: Оценка технического состояния и проектирование железобетонных конструкций.

**Жуль Данил Андреевич** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: Оценка технического состояния и проектирование железобетонных конструкций.

**Волков Андрій Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних конструкцій ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження міцнісних та деформативних властивостей конструкцій з модифікованих високоміцних бетонів, оцінка технічного стану і проектування залізобетонних конструкцій.

**Прокопенко Дана Романівна** – магістрант ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: оцінка технічного стану та проектування залізобетонних конструкцій.

**Мозговий Денис Олегович** – магістрант ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: оцінка технічного стану та проектування залізобетонних конструкцій.

**Жуль Данил Андрійович** – магістрант ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: оцінка технічного стану та проектування залізобетонних конструкцій.

**Volkov Andrei** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Reinforced Concrete Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: determination of strength and strain properties of modified high strength concrete structures, estimation of technical state and design of reinforced concrete constructions.

**Prokopenko Dana** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: assessment of technical condition and design of reinforced concrete structures.

**Mozgovoi Denis** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: assessment of technical condition and design of reinforced concrete structures.

**Zhul Danil** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: assessment of technical condition and design of reinforced concrete structures.