

ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА УСИЛИЯ В БАШЕННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ГРАДИРНЕ

Научная статья

Ращепкина С.А.^{1,*}, Габалова Д.В.²

^{1,2} Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», Балаково,
Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (rashh2008[at]yandex.ru)

Аннотация

Приведен обзор научных работ по исследованию градирен на различные ветровые нагрузки; выявлены достоинства, недостатки башенных градирен, дана классификация градирен по ряду важнейших признаков. Представлен расчет продольных и кольцевых усилий в градирне в зависимости от ее высоты для разных ветровых районов; показано значительное влияние величины ветровой нагрузки на усилия в башне; при этом продольные усилия на порядок выше кольцевых усилий. Выявлено, что у горловины усилия как продольные, так и кольцевые имеют максимальные значения; показано, что при разных углах кольцевого направления ветра продольные и кольцевые усилия имеют разные знаки.

Проведенный расчет и анализ может быть использован при проектировании и строительстве металлических башенных градирен гиперболоидной формы на объектах энергетики. При этом требуется уделять большое внимание к расчету при их возведении и эксплуатации в районах со значительной ветровой нагрузкой.

Ключевые слова: башенная градирня, каркасно-обшивная, ветровое воздействие, районы строительства, анализ, продольные и кольцевые усилия.

THE INFLUENCE OF WIND LOADING ON STRAIN IN A TOWER METAL COOLER

Research article

Rashchepkina S.A.^{1,*}, Gabalova D.V.²

^{1,2} National Nuclear Research University "Moscow Institute of Engineering and Physics", Balakovo, Russian Federation

* Corresponding author (rashh2008[at]yandex.ru)

Abstract

A review of scientific works on cooler towers under different wind loadings is presented; advantages and disadvantages of tower coolers are revealed; a classification of them according to a number of the most important characteristics is given. Longitudinal and ring strengths in cooler towers depending on their height for different windy regions were calculated; considerable influence of wind loading size upon efforts in a cooler tower was shown; longitudinal strengths are by an order of magnitude higher than ring strengths. It is revealed that both longitudinal and ring strengths have maximum values at the neck; it is shown that longitudinal and ring strengths have different signs at different angles of ring wind direction.

The performed calculation and analysis can be used in the design and construction of metal tower coolers of hyperboloidal shape on energy facilities. In this case, it is required to pay great attention to the calculation during their construction and operation in areas with significant wind loading.

Keywords: tower cooler, frame and coating, wind loading, construction areas, analysis, longitudinal and ring strengths.

Введение

Атомная и тепловая электростанции являются энергетическими объектами, которые осуществляют выработку тепловой и электрической энергий для нужд промышленных и гражданских потребителей. Для охлаждения технологического оборудования, применяемого на объектах ТЭС и АЭС, используется огромное количество оборотной воды, что требует применения специальных сооружений, устройств, включая градирни, которые позволяют охлаждать такую воду. Есть множество градирен, имеющих свои достоинства, недостатки и применение.

В статье [1] предлагаются соотношения для оценки эффективности работы промышленных градирен в зависимости от конструктивных, технологических показателей, условий окружающей среды. Приводится сравнение результатов, полученных с помощью этих соотношений с результатами, найденных с использованием традиционных методов и при проведении натурных испытаний градирен. В статье [2] излагается технология возведения тонкостенных железобетонных конструкций гиперболических градирен: технология устройства арматурного каркаса, технология монтажа подъемно-переставной опалубки, особенности подъемных механизмов для высотного строительства, особенности схемы разбивки опорного каркаса сооружения и технология бетонирования на высоте. В работе [3] отмечено, что в процессе эксплуатации нужно предотвращать проблемы, связанные с железобетонной оболочкой градирни, иначе неизбежен процесс разрушения высотного сооружения.

Разработанная технология бескранового монтажа для капитального ремонта или реконструкции металлических башенных градирен, рассмотренная в работе [4], позволяет выполнить работы по замене аварийных строительных конструкций внутреннего каркаса, демонтажу системы водоводов, устаревших блоков орошения. Она обеспечивает монтаж новой водораспределительной системы и современных полимерных блоков орошения в стесненных условиях действующего производственного предприятия, с минимальными сроками подготовки и производства монтажных работ и значительно меньшими затратами относительно использования для данных работ башенных и стреловых кранов.

В статье [5] предложен алгоритм оценки погрешности результатов при опытном исследовании характеристик оросителей промышленных градирен. Представлены формулы и результаты расчета погрешностей для реального эксперимента по исследованию характеристик оросителей.

В статье [6] представлены аналитические зависимости для оценки температурного перепада воды, охлаждаемой в градирнях, а также соотношения для определения вспомогательных параметров для типовых методик расчета теплотехнических характеристик градирен. Приводится анализ данных зависимостей, устанавливаются определенные закономерности. Авторами работы [7] установлено, что для заданной конструкции башенного охладителя его работа определяется отношением массовых потоков воды и воздуха. Принятая математическая модель процесса охлаждения описывает совместный теплообмен в градирне, течение водяной пленки, осаждение водяных капель и другие важные параметры.

Новизна работы [8] состоит в учете взаимодействия градирни и турбоустановки. При этом эффективность замены оросителя оказывается выше. С учетом затрат на приобретение элементов оросителя и его монтаж срок окупаемости модернизации оросителя составит 2,5 года.

Авторами статьи проведен краткий обзор различных типов башенных градирен, выявлены достоинства, недостатки [9], [10]. Градирни можно классифицировать по различным признакам. Наиболее целесообразно их различать по передаче тепла воздуху:

- открытые (испарительные), где передача тепла от воды атмосферному воздуху осуществляется за счет испарения капель; такой тип делится на безнасадочные и оросительные;
- закрытые (радиаторные), где передача тепла от воды воздуху осуществляется через стенку радиаторов за счет теплопроводности и конвекции.

По форме башенные градирни различают:

- конические;
- гиперболические;
- цилиндрические (или близкие к ним).

Наиболее эффективные гиперболические градирни. Они обладают наиболее высокими эксплуатационными качествами и максимальной устойчивостью. По материалу башня градирни может быть выполнена из монолитного железобетона и сборных металлических элементов – каркасно-обшивные.

Каркасно-обшивные градирни могут быть обшиты алюминиевыми, металлическими гофрированными листами, асбестоцементными листами или пластиком. У таких градирен необходимо герметизировать стыки листов с помощью, например, рулонных лент, а у железобетонных – регулярно поддерживать и восстанавливать гидроизоляцию, применяя специальные жидкие или рулонные материалы.

Целью данной работы является расчет пространственной многогранной металлической оболочки, установление влияния значений ветровой нагрузки на усилия в элементах башни и выявление зоны максимальных усилий в стержнях каркаса. Авторам не известны исследования по поставленной задаче.

Актуальность проводимого исследования заключается в том, что с увеличением мощности тепловых и атомных электростанций повышается и количество воды, которую необходимо охлаждать, что, соответственно, требует проектирования градирен высокопроизводительных и большой высоты. В таких высотных сооружениях ветровая нагрузка оказывает существенное влияние на работу башни. Поэтому представленная тема является весьма актуальной, и ее изучение важно для развития энергетики России.

Новизна полученных результатов состоит в установлении идентичности и регулярности продольных и кольцевых усилий по высоте гиперболической башни; при этом, выявлено, что максимальные продольные и кольцевые усилия стабильно наблюдаются на отметке 2/3 высоты каркаса (у горловины) для всех рассмотренных ветровых районов. Показано, что кольцевые усилия на отметке 1/3 высоты каркаса меняют знак, а продольные усилия на порядок выше, чем кольцевые для всех ветровых районов.

Методы и принципы исследования

В статье рассмотрен расчет каркасно-обшивной градирни при следующих исходных данных (рис. 1): площадь орошения – 6900 м²; высота градирни – 130 м; материал: каркас – сталь С345; обшивка – сплав алюминия марки 1105АН2 в соответствии с ТУ 1–3–143–93 и ТУ 1–801–14–2001; ветровые районы: Ia, II, IV, VII и в соответствии со сводами правил: СП 20.13330.2016, СП 16.13330.2017 и СП 4.13130.2013.

Нормативное значение ветровой нагрузки определяется как сумма статической и динамической составляющей ветровой нагрузки:

$$w = w_m + w_g.$$

Нормативное значение статической составляющей ветровой нагрузки:

$$w_m = w_0 \cdot k(z_e),$$

где w_0 , $k(z_e)$ – соответственно – нормативное значение ветрового давления; коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте башни градирни и определенный для середины каждого из пяти расчетных участков, приведен в таблице 1 и аэродинамический коэффициент.

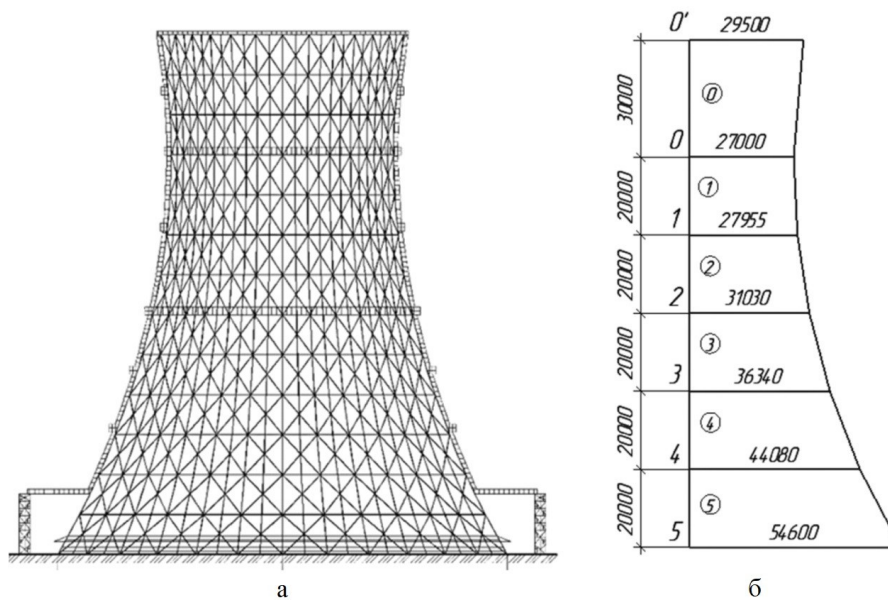


Рисунок 1 - Схемы башни градирни:
а - конструктивная, б – геометрическая

Нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки определяется:

$$w_g = w_0 \cdot \omega \cdot v \cdot \xi_1 \cdot m.$$

Коэффициенты, учитывающие форму собственных колебаний оболочки башни, вычислены и занесены в таблицу 1. Коэффициенты пульсации скоростного напора для середины участков приняты по СП 20.13330.2016.

Для определения коэффициентов v , ξ_1 предварительно определяем период основной частоты собственных колебаний башни по формуле [11]:

$$T_1 = \left(\frac{H}{r_{cp}} \right)^2 \cdot r_{cp} \cdot 10^{-3} = \frac{130^2}{42,05} \cdot 10^{-3} = 0,4 \text{ с.}$$

где $r_{cp} = \frac{r_v + r_n}{2} = \frac{29,5 + 54,6}{2} = 42,05 \text{ м.}$

Параметр ξ_1 определяется:

$$\xi_1 = \frac{T_1 \cdot v}{1200}, \quad v = 4\sqrt{n \cdot w_0} = 4\sqrt{1,3 \cdot 1,3} = 25 \text{ м/с}, \quad \text{тогда} \quad \xi_1 = \frac{0,4 \cdot 25}{1200} = 0,008.$$

По найденному параметру для высоты градирни равной 130 м находим коэффициент, учитывающий пространственную корреляцию пульсации скорости ветра – $v=0,55$ [11].

Расчетная величина ветровой нагрузки определяется по выражению:

$$\frac{w}{c} = 1,3 \cdot w_0 \cdot k \cdot (1 + 0,77 \cdot \omega \cdot m).$$

Все расчеты сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Значения расчетных параметров

Участок	Коэффициенты, учитывающие форму колебаний		Коэффициенты пульсации	w/c, кН/м ²
	k	ω	m	
0	1,690	1,285	0,655	1,086
1	1,525	0,865	0,685	0,866
2	1,375	0,586	0,720	0,710
3	1,200	0,340	0,770	0,562
4	0,975	0,154	0,860	0,419
5	0,650	0,031	1,060	0,260

Амплитудные значения членов ряда аэродинамического коэффициента определяются в зависимости от высоты башни градирни и вычисляются по кривой, которая описана рядом (рис. 2):

$$c = \sum_{n=0}^k c_n \cdot \cos(n \cdot \theta).$$

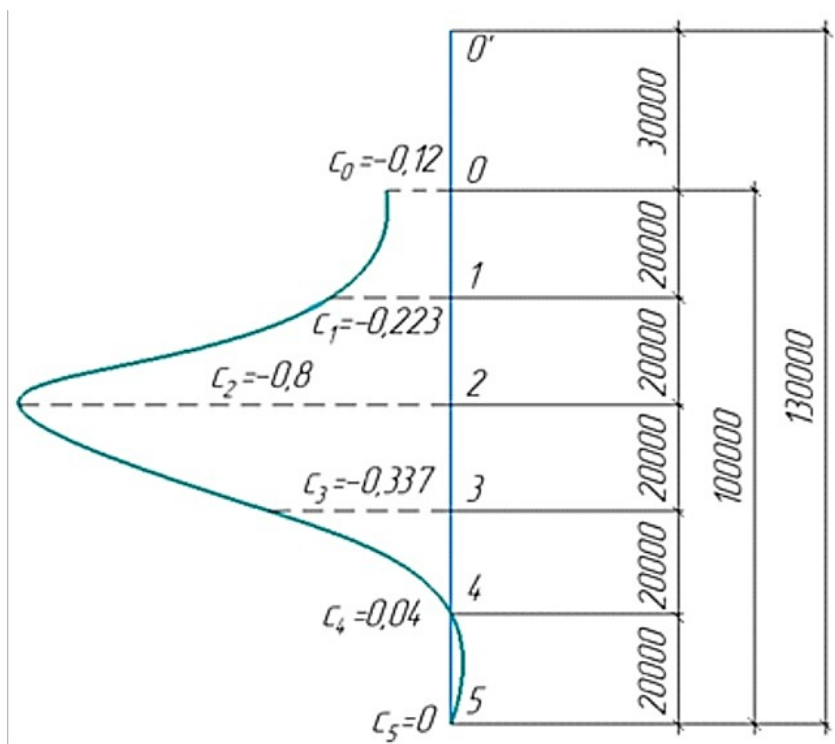


Рисунок 2 - Кривые для определения величин коэффициентов c_n для различной высоты градирни

Основные результаты

Результаты расчета усилий в каркасно-обшивной градирне высотой 130м на нижней границе каждого расчетного участка от ветровой нагрузки для четырех ветровых районов приведены на графиках (рис.3 и рис. 4).

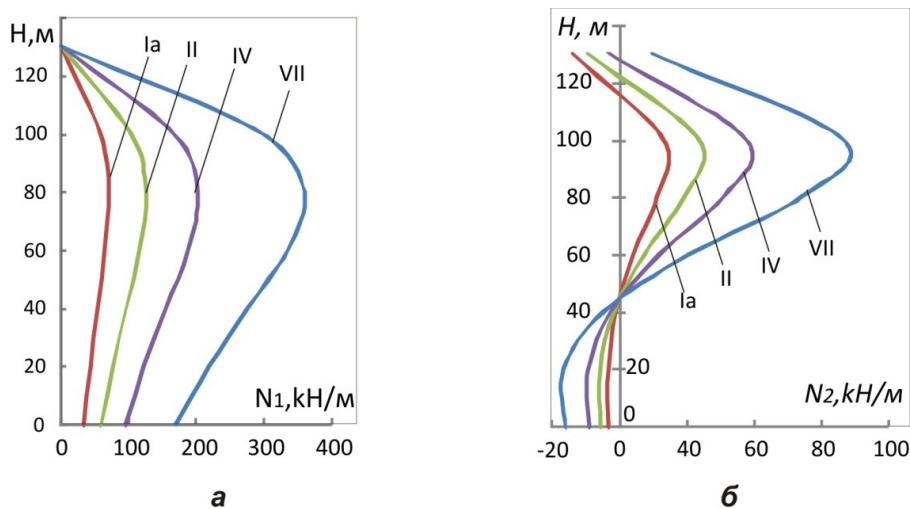


Рисунок 3 - Зависимость «Высота градирни – усилия» при $\Theta=0$:
а – продольные; б – кольцевые; Ia, II, IV, VII – ветровые районы

Анализ кривых (рис. 3) построенных для градирни высотой 130 м при угле $\Theta=0$. показал следующее:

- изменение усилий носит регулярный характер; кривые индентичны;
 - максимальные значения наблюдаются при высоте градирни 80-85 метров, как продольных, так и кольцевых усилий;
 - на высоте 80 метров продольные усилия (при сравнении Ia и IV районов) увеличиваются в 2,8 раза; причем существенное увеличение наблюдается, начиная с IV ветрового района;
 - кольцевые усилия для Ia и IV районов по ветровой нагрузке изменяются 2,7 раз;
 - при высоте 40 метров кольцевые усилия меняют знак; причем при всех рассмотренных районах строительства.
- На рис. 4 представлены результаты расчета башни градирни при $\Theta = \pi/2$ для различных районов строительства.

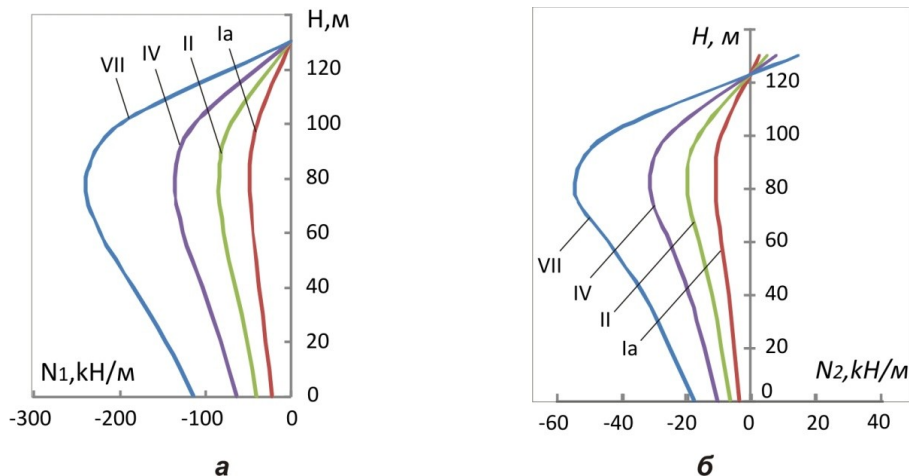


Рисунок 4 - Графики зависимости «Высота градирни – усилия» при $\Theta = \pi/2$:
 а – продольные; б – кольцевые; Ia, II, IV, VII – ветровые районы

Анализ полученных результатов расчета башни позволил выявить:

- продольные усилия практически на порядок выше, чем кольцевые усилия;
- значения продольных усилий по всем отметкам отрицательные;
- кольцевые усилия до отметки 120 метров имеют все значения отрицательные, а выше нее имеются положительные значения; максимальные усилия наблюдаются на отметке 80 метров;
- сравнение продольных и кольцевых усилий на отметке 80 метров для Ia и VII ветровых районов позволило выявить расхождение значений в пять раз.

Таким образом, можно утверждать, что ветровые районы оказывают очень большое влияние на усилия в стержнях пространственного каркаса градирни; и соответствующие поперечные сечения элементов каркаса будут иметь большие поперечные сечения, что необходимо учитывать даже при предварительном его расчете в процессе определения постоянных нагрузок.

Сравнение значений продольных и кольцевых усилий для II-го ветрового района приведено в таблице 2.

Таблица 2 - Изменение усилий по высоте градирни

Отметка , м	Продольные усилия, кН/м, N_1				Кольцевые усилия, кН/м, N_2			
	$\theta = 0$	Прирост усилий	$\theta = \pi/2$	Прирост усилий	$\theta = 0$	Прирост усилий	$\theta = \pi/2$	Прирост усилий
130	0	-	0	-	10,56	-13,07	5,28	20,92
100	105,04	-21,89	-69,49	14,51	23,63	4,45	-15,64	3,57
80	126,93	8,76	-84,00	5,74	19,18	11,82	-19,21	3,64
60	118,17	20,54	-78,26	13,54	7,36	8,99	-15,57	3,94
40	97,63	20,28	-64,72	13,40	-1,63	4,14	-11,63	2,83
20	77,35	17,16	-51,32	11,35	-5,77	0,18	-8,80	2,71
0	60,19	-	-39,97	-	-5,59	-	-6,09	-

Анализ таблицы 2 показал заметную разницу в приросте усилий по высоте башни при разных кольцевых углах. Особенно это четко просматривается с отметки 80 метров. Именно с этого момента наблюдается существенная неравномерность воздействия ветровой нагрузки на сооружение и появления соответствующих знакопеременных усилий. Это требует особого внимания к ветровым воздействиям и, в частности при строительстве в районах с большой ветровой нагрузкой, где прирост усилий с увеличением высоты сооружения заметно увеличивается.

Обсуждение

Расчет и анализ башенной металлической каркасно-обшивной градирни на воздействие ветровой нагрузки показал значительное влияние величины ветровой нагрузки на усилия в градирне; при этом продольные усилия на порядок выше кольцевых усилий; выявлено, что на отметке 80 м (2/3 высоты сооружения) усилия как продольные, так и кольцевые имеют максимальные значения; показано, что при разных значениях кольцевых углов продольные и кольцевые усилия имеют разные знаки.

Заключение

Строительство высотных градирен гиперболоидной формы для рассмотренных районов требует от проектировщиков тщательного расчета, а для возведения башни принятие качественных материалов и строгое соблюдение всех нормативных документов. При возведении градирен необходимо уделять большое внимание нагрузкам и воздействию при их строительстве в районах со значительной ветровой нагрузкой и, постоянно вести

наблюдение за работой сооружения в процессе эксплуатации. Представленные в работе результаты исследований оболочки градирни на воздействие ветровой нагрузки показывают важность района строительства при возведении каркасно-обшивных градирен.

Полученные результаты исследования башен можно рекомендовать в практику проектирования металлических градирен из сборных элементов гиперболической формы на объектах энергетики.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Федяев В.Л. Эффективность оросительных градирен / В.Л. Федяев, Е.М. Власов, Р.Ф. Гайнуллин // Вестник международной академии холода. — 2012. — 4.— с. 35-39.
2. Михалкин А.Н. Возведения тонкостенных железобетонных конструкций градирен на примере Волгодонской АЭС / А.Н. Михалкин, К.В. Качейкина, М.А. Фахратов // Инновации и инвестиции. — 2018. — 4.— с. 329-332.
3. Синькевич А.Н. Проблемы эксплуатации башенных градирен из монолитного железобетона / А.Н. Синькевич, А.В. Мучинская // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. — 2013. — 9.— с. 172-176.
4. Ладнушкин А.А. Технология бескранового монтажа при капитальном ремонте и модернизации башенных градирен ТЭЦ / А.А. Ладнушкин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2016. — 4.— с. 433-438.
5. Давлетшин Ф.М. Оценка погрешности результатов при опытно-исследовательском исследовании характеристик оросителей промышленных градирен / Ф.М. Давлетшин, К.Х. Гильфанов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2007. — 1-2. — с. 111.
6. Федяев В.Л. Оценка охлаждающей способности оросительных градирен / В.Л. Федяев, Е.М. Власов, Р.Ф. Гайнуллина и др. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2011. — 3-4.— с. 27-32.
7. Битюков В.К. Математическая модель охлаждения оборотной воды в градирне с механической тягой / В.К. Битюков, С.Г. Тихомиров, Д.В. Арапов и др. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. — 2014. — 1. — с. 51-55.
8. Галацан М.П. Влияние эффективности градирни на показатели экономичности турбоустановки / М.П. Галацан, В.П. Кравченко, В.С. Киров // Проблемы региональной энергетики. — 2019. — 2. — с. 64-73.
9. Ращепкина С.А. Расчет и оптимальное проектирование башенной градирни / С.А. Ращепкина, Э.К. Акимова, Ю.А. Попова // Вестник КРСУ. — 2021. — Т. 21. — 4. — с. 143-150.
10. Ращепкина С.А. Особенности проектирования градирен из сборных элементов в форме гиперболоида вращения / С.А. Ращепкина, Э.К. Акимова // Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий. — Балаково: БИТИ НИЯУ МИФИ, 2020. — Т. 2. — с.67-72.
11. Астряб С.М. Проектирование металлических конструкций градирен / С.М. Астряб, Ю.В. Соболев. — М: МИСИ, 1984. — 56 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Fedyaev V.L. Effektivnost' orositel'nyh gradiren [Efficiency of irrigation cooling towers] / V.L. Fedyaev, E.M. Vlasov, R.F. Gajnullin // Vestnik mezhdunarodnoj akademii holoda [Bulletin of the International Academy of Cold]. — 2012. — 4. — p. 35-39. [in Russian]
2. Mihalkin A.N. Vozvedeniya tonkostennyh zhelezobetonnyh konstrukcij gradiren na primere Volgodonskoj AES [Erecting thin-walled reinforced concrete structures of cooling towers on the example of the Volgodonsk NPP] / A.N. Mihalkin, K.V. Kachejkina, M.A. Fahratrov // Innovacii i investicii [Innovations and investments]. — 2018. — 4. — p. 329-332. [in Russian]
3. Sin'kevich A.N. Problemy ekspluatacii bashennyh gradiren iz monolitnogo zhelezobetona [Problems of operation of tower cooling towers made of monolithic reinforced concrete] / A.N. Sin'kevich, A.V. Muchinskaya // Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty [Fundamental and applied research: problems and results].— 2013. — 9. — p. 172-176. [in Russian]
4. Ladnushkin A.A. Tekhnologiya beskranovogo montazha pri kapital'nom remonte i modernizacii bashennyh gradiren TEC [Technology of crane-free installation during overhaul and modernization of tower cooling towers of CHP] / A.A. Ladnushkin // Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering].— 2016. — 4. — p. 433-438. [in Russian]
5. Davletshin F.M. Ocenka pogreshnosti rezul'tatov pri opytном issledovanii harakteristik orositelej promyshlennyh gradiren [Estimation of the error of the results in the experimental study of the characteristics of industrial cooling tower sprinklers] / F.M. Davletshin, K.H. Gil'fanov // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki [News of higher educational institutions. Energy problems].— 2007. — 1-2. — p. 111. [in Russian]
6. Fedyaev V.L. Ocenka ohlazhdayushchej sposobnosti orositel'nyh gradiren [Assessment of the cooling capacity of irrigation cooling towers] / V.L. Fedyaev, E.M. Vlasov, R.F. Gajnullina et al. // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki [News of higher educational institutions. Energy problems].— 2011. — 3-4. — p. 27-32. [in Russian]

7. Bityukov V.K. Matematicheskaya model' ohlazhdeniya oborotnoj vody v gradirne s mekhanicheskoj tyagoy [Mathematical model of circulating water cooling in a cooling tower with mechanical traction] / V.K. Bityukov, S.G. Tihomirov, D.V. Arapov et al. // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tekhnologij [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies]. — 2014. — 1. — p. 51-55. [in Russian]
8. Galacan M.P. Vliyanie effektivnosti gradirni na pokazateli ekonomichnosti turboustanovki [The influence of cooling tower efficiency on the efficiency indicators of a turbine installation] / M.P. Galacan, V.P. Kravchenko, V.S. Kirov // Problemy regional'noj energetiki [Problems of regional energy]. — 2019. — 2.— p. 64-73. [in Russian]
9. Rashchepkina S.A. Raschet i optimal'noe proektirovanie bashennoj gradirni [Calculation and optimal design of a tower cooling tower] / S.A. Rashchepkina, E.K. Akimova, Yu.A. Popova // Vestnik KRSU [Bulletin of the KRSU]. — 2021. — Vol. 21. — 4. — p. 143-150. [in Russian]
10. Rashchepkina S.A. Osobennosti proektirovaniya gradiren iz sbornyh elementov v forme giperboloida vrashcheniya [Design features of cooling towers made of prefabricated elements in the form of a hyperboloid of rotation] / S.A. Rashchepkina, E.K. Akimova // Aktual'nye problemy i puti razvitiya energetiki, tekhniki i tekhnologij [Current problems and ways of development of energy, engineering and technology]. — Balakovo: BITI NIYAU MPhI, 2020. — Vol. 2. — p. 67-72. [in Russian]
11. Astryab S.M. Proektirovanie metallicheskih konstrukcij gradiren [Design of metal structures of cooling towers] / S.M. Astryab, Yu.V. Sobolev. — M: MISI, 1984. — 56 p. [in Russian]