



УДК 621.438:621.175:66.045.53

DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.24

Ю. Э. ДЕМИНА
А. А. КУДИНОВ

ЗАЩИТА ОТ ОБМЕРЗАНИЯ УСТЬЯ ВЫТЯЖНОЙ БАШНИ ГРАДИРНИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЯГОЙ

FROST PROTECTION OF THE MOUTH OF THE EXHAUST TOWER
OF THE COOLING TOWER WITH NATURAL DRAFT

В статье приводятся результаты численного моделирования системы защиты устья вытяжной башни градирни с естественной тягой от обмерзания. Для предотвращения образования льда предлагается установить в устье градирни систему подачи атмосферного воздуха, которая обеспечивает создание защитного пограничного слоя у внутренней стенки градирни и позволяет отделить теплый влажный воздух градирни от холодных стенок. Для проверки возможности применения такой схемы выполнено численное моделирование процесса с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST. Использование системы нагнетания дополнительного расхода воздуха дает возможность повысить эффективность и надежность градирни с естественной тягой и тепловой электростанции в целом. Моделирование системы защиты градирни от образования наледи показало возможность применения данной схемы во всех диапазонах рабочих температур наружного воздуха.

Ключевые слова: градирня, льдообразование, тепловая электрическая станция, численная модель, надежность

Основным источником электрической и тепловой энергии в РФ являются тепловые электрические станции (ТЭС) [1]. Энергоэффективность ТЭС зависит от надежности работы отдельного оборудования в составе источника [2, 3]. Одним из основных объектов ТЭС является система оборотного водоснабжения [4, 5]. В холодный период года данное оборудо-

The article presents the results of numerical simulation of the protection system of the mouth of the exhaust tower of a cooling tower with natural traction from freezing. To prevent the formation of ice, it is proposed to install an atmospheric air supply system at the mouth of the cooling tower, which ensures the creation of a protective boundary layer at the inner wall of the cooling tower and allows you to separate the warm moist air of the cooling tower from the cold walls. To test the possibility of using such a scheme, a numerical simulation of the process was performed using the k -SST turbulence model. The use of an additional air flow injection system makes it possible to increase the efficiency and reliability of a naturally aspirated cooling tower and a thermal power plant as a whole. Modeling of the cooling tower protection system from the formation of ice showed the possibility of using this scheme in all ranges of outdoor operating temperatures.

Keywords: cooling tower, ice formation, thermal power plant, numerical model, reliability

вание обладает пониженной надежностью при эксплуатации. При отрицательных температурах окружающей среды в устье градирни подогретый влажный воздух, взаимодействуя с ее холодными стенками, охлаждается ниже точки росы, при этом водяные пары конденсируются, конденсат намерзает на стенках вытяжной башни градирни, образуется наледь. При темпера-

туре стенки выше 0 °С наледь отделяется и, падая с высоты, разрушает расположенные ниже элементы градирни.

Для защиты от образования наледи в устье градирни предлагается установить систему дополнительной подачи атмосферного воздуха [6, 7]. Воздухораспределительное устройство состоит из кольцевого коллектора с щелевыми отверстиями. Принципиальная схема системы подачи воздуха представлена на рис. 1. Подача сухого атмосферного воздуха настилающими струями позволяет отделить подогретый влажный воздух, движущийся в вытяжной башне градирни, от холодных стенок вытяжной башни и предотвратить конденсацию водяных паров на ее внутренней поверхности.

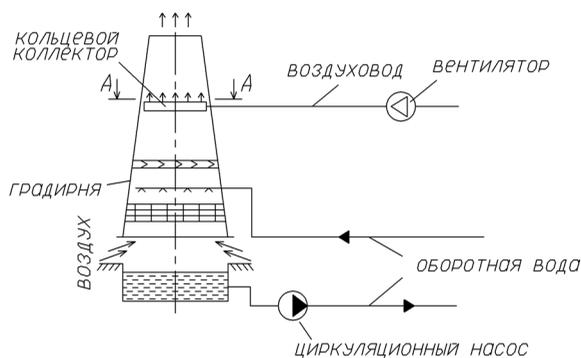


Рис. 1. Принципиальная схема системы подачи воздуха

Для проверки возможности применения такой схемы выполнено численное моделирование процесса в среде OpenFOAM с использованием оболочки SimScale. Моделирование было выполнено с использованием модели турбулентности k- ω SST [8] в стационарной постановке с помощью усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса [9, 10]:

$$\rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (TU) \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla U : \tau_{ij} , \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla U : \tau_{ij} = & \frac{\partial U_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial U_x \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial U_x \tau_{zx}}{\partial z} + \\ & + \frac{\partial U_y \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial U_y \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial U_y \tau_{zy}}{\partial z} + \\ & + \frac{\partial U_z \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial U_z \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial U_z \tau_{zz}}{\partial z} . \end{aligned} \quad (2)$$

В качестве геометрической модели принята башенная градирня БГ-2300, установленная на ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ.

Схема размещения воздуховода показана на рис. 2.

Расчетная область ограничена верхней частью градирни, показана на рис. 3.

Воздуховод дополнительного нагнетания воздуха расположен на глубине 10 м от верхней кромки градирни. Для подачи дутьевого воздуха в верхней части воздуховода обустроены щелевые отверстия шириной 100 мм.

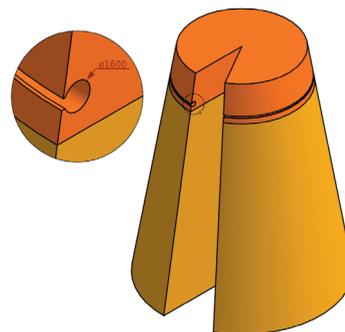


Рис. 3. Геометрия расчетной области градирни

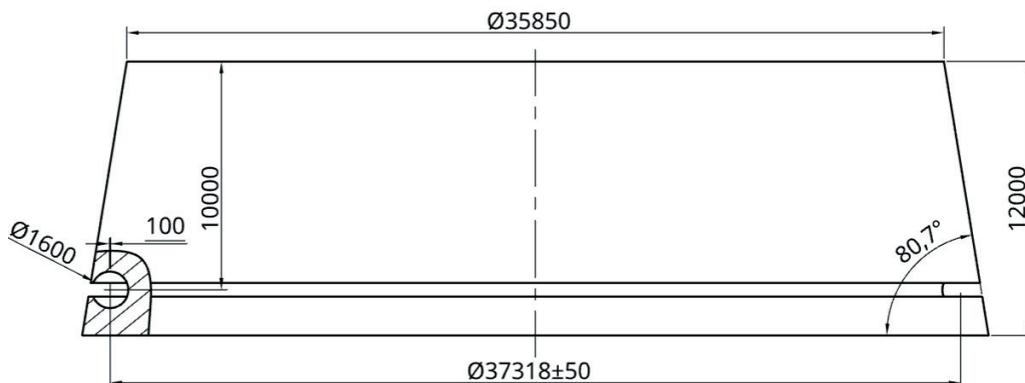


Рис. 2. Размещение воздуховода дополнительной подачи воздуха в устье градирни

Расчетная область была дискретизирована четырьмя комбинированными сетками. Сетки содержали тетраэдральные и гексагональные ячейки со средним линейным размером $\Delta x = 216,8 - 415,1$ мм (табл. 1), который определяется как среднее арифметическое от производных линейных размеров всех ячеек

$$\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \sqrt[3]{V_i}}{N}, \quad (3)$$

где V_i – объем i -й ячейки, мм³;

N – количество ячеек в расчетной сетке.

В объеме расчетной области ячейки имеют максимальный размер, а в пристеночной зоне выполнено измельчение сетки (рис. 4).

В пограничном слое ячейки формируют призматические слои для обеспечения достаточного разрешения на границе с поверхностью теплообмена. Три слоя со степенью роста 1,5 обеспечивают величину безразмерного рас-

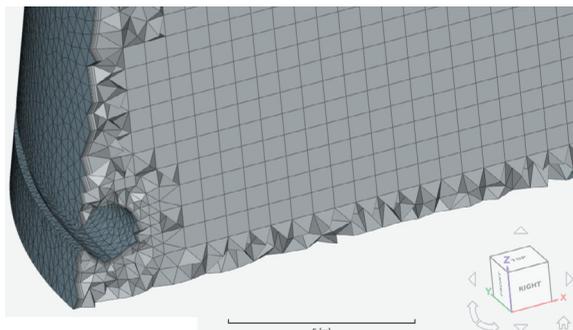


Рис. 4. Разрез расчетной сетки

стояния $y^+ \sim 1$. Толщина первого слоя y , мм, была определена относительно требуемой величины безразмерного расстояния y^+ и сдвиговой скорости U^* , м/с, по формуле

$$y = \frac{y^+ \cdot \mu}{\rho \cdot U^*}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости потока, Па·с;

ρ – плотность потока.

Сдвиговая скорость была определена по формуле

$$U^* = \sqrt{\frac{c_f \cdot U_\infty^2}{2}}, \quad (5)$$

где U_∞ – скорость потока вдали от стенки, м/с;

c_f – коэффициент сдвигового трения [10]:

$$c_f = (2 \log_{10}(Re_x) - 0,65)^{-2,3}, \quad (6)$$

где Re_x – критерий Рейнольдса с определяющим размером $L = 10$ м.

Влажный теплый воздух градирни и воздух дополнительного нагнетания рассматривались как смеси сухого воздуха и водяного пара. Диапазон рабочих температур влажного воздуха градирни составил 15-30 °С. Для такого узкого диапазона стандартные зависимости термодинамических параметров от температуры дают значительную погрешность, поэтому в модели использованы собственные аппроксимации. Для расчета молярной теплоемкости, энтальпии и энтропии применяются справочные данные [11]:

$$c_p(T) = R(a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4), \quad (7)$$

Таблица 1

Расчетные сетки

Относительный размер ячеек (номер сетки)	Количество ячеек	Средний размер ячеек Δx , мм	Максимальный размер ячеек Δx_{max} , мм	Минимальный размер ячеек Δx_{min} , мм
3	185200	415,1	2535	35,3
4	251800	374,7	2030	25,0
5	63500	275,3	634	19,0
6	1300000	216,8	433	15,5

$$h(T) = R(a_0 \cdot T + \frac{a_1 \cdot T^2}{2} + \frac{a_2 \cdot T^3}{3} + \frac{a_3 \cdot T^4}{4} + \frac{a_4 \cdot T^5}{5} + a_5), \quad (8)$$

$$S(T) = R(a_0 \cdot \ln(T) + a_1 \cdot T + \frac{a_2 \cdot T^2}{2} + \frac{a_3 \cdot T^3}{3} + \frac{a_4 \cdot T^4}{4} + a_6). \quad (9)$$

Значения термодинамических коэффициентов для сухого воздуха и водяного пара представлены в табл. 2.

Плотность для каждого компонента смеси рассчитывалась по закону для идеального газа

$$\rho = \frac{p}{RT}, \tag{10}$$

где p – давление, Па;

T – температура, К;

R – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Коэффициент динамической вязкости компонентов рабочей смеси была рассчитана по выражению Сазерленда [12] с коэффициентами, подобранными для рассматриваемого температурного диапазона:

$$\mu_{\text{возд}} = \frac{1,46e - 6\sqrt{T}}{1 + 110,62/T}, \tag{11}$$

$$\mu_{\text{вп}} = \frac{2,45e - 6\sqrt{T}}{1 + 1062,72/T}. \tag{12}$$

Для выявления эффективности системы дополнительной подачи атмосферного воздуха в устье градирни проводилось численное моделирование. Исходные данные представлены в табл. 3. Критерием оценки эффективности является толщина защитного пограничного слоя. Защитный слой представляет собой пристеночный объем воздуха с температурой на 2 °С ниже температуры насыщения влажного воздуха градирни.

В результате моделирования системы дополнительного нагнетания воздуха градирни в соответствии с режимными параметрами были получены пространственные распределения скорости, давления, температуры и других термодинамических параметров в рассматриваемом объеме градирни (рис. 5), на основе которых получены геометрические параметры защитного слоя.

Результаты численного моделирования представлены в табл. 4.

На рис. 6 показаны поперечные сечения защитного слоя для серии расчетов башенной градирни. Видно, что все рассмотренные расчетные

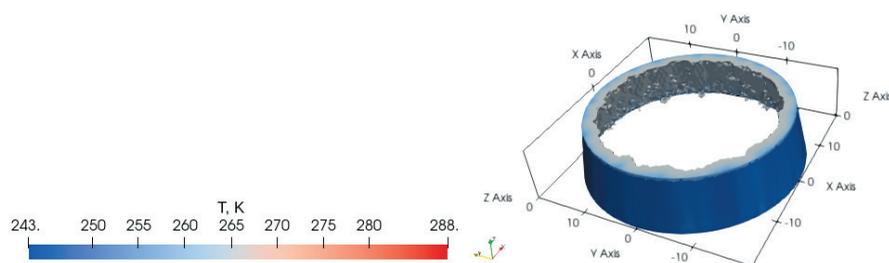


Рис. 5. Пространственное распределение температур при $t_n = -30$ °С

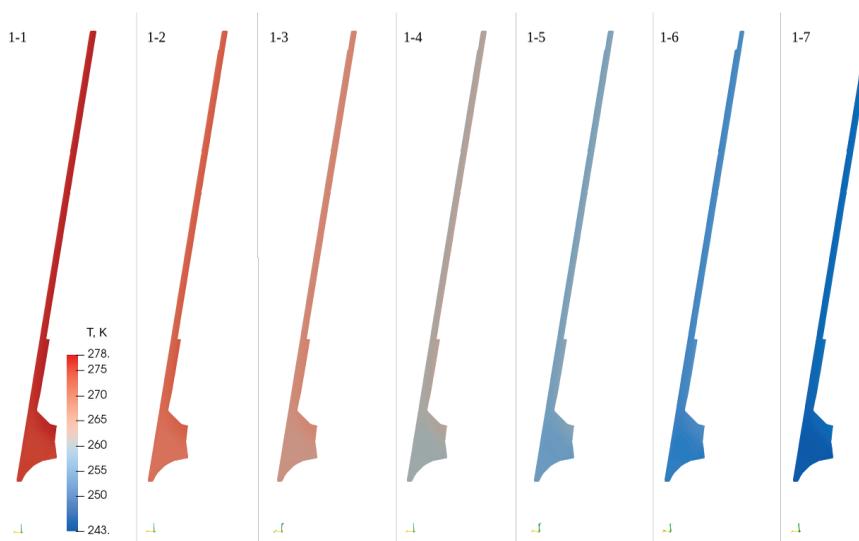


Рис. 6. Защитные слои в сечении для градирни

Таблица 2

Термодинамические коэффициенты для сухого воздуха и водяного пара

Среда	a_0	a_1	a_0	a_0	a_0	a_0	a_0
Воздух	3,50	0	0	0	0	433,90	-6,45
Водяной пар	1,59	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$3,67 \cdot 10^{-5}$	$2,91 \cdot 10^{-7}$	$4,39 \cdot 10^{-10}$	4546,26	5,71

Таблица 3

Исходные данные

№ расчета	Температура наружного воздуха $t_{нр}$, °С	Температура влажного воздуха градирни $t_{ввр}$, °С	Расход влажного воздуха градирни $G_{ввр}$, кг/с	Доля расхода воздуха дополнительного нагнетания, %
1	0	27,2	1598	5
2	-5	26,0	1604	5
3	-10	24,6	1578	5
4	-15	23,4	1546	5
5	-20	22,0	1532	5
6	-25	20,9	1511	5
7	-30	19,6	1491	5

Таблица 4

Параметры защитного слоя

№ расчета	Объем слоя, м ³	Толщина слоя, мм
1	995,77	861,39
2	1025,12	886,78
3	1051,71	909,78
4	1075,85	930,67
5	1093,55	945,98
6	1110,63	960,75
7	1125,51	973,62

варианты обеспечивают полное покрытие внутренней поверхности стены градирни защитным слоем холодного атмосферного воздуха с температурой на 2 °С ниже температуры насыщения.

В результате полученное среднее значение толщины неизолированного гидродинамического защитного слоя для рассмотренных расчетных вариантов составило $\delta_{зс} = 924,14$ мм.

Выводы. 1. Численное моделирование системы защиты градирни от образования наледи показало, что наличие неизолированного гидродинамического пограничного слоя предотвращает конденсацию водяных паров на внутренней поверхности стенки вытяжной башни градирни. Таким образом, осуществляется защита внутренней поверхности стенки градирни от намерзания льда и от конденсатной коррозии.

2. Результаты моделирования показали в целом удовлетворительную работу системы дополнительного нагнетания воздуха во всех рассмотренных случаях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об Энергетической стратегии России на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р.

2. Кудинов А.А., Демина Ю.Э. Расчет системы отвода уходящих дымовых газов газотурбинной установки через башню градирни // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 1(30). С. 135-138. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.23.

3. Баландина О.А., Пуринг С.М. Исследование влияния температуры воздуха на уровень выделения оксидов азота в дымовых газах котельных установок // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9. № 4 (37). С. 27-32. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.5.

4. Зиганшина С.К., Кудинов А.А., Демина Ю.Э. Повышение экономичности ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ путем отвода в атмосферу отработавших в котле-утилизаторе газов через вытяжную башню градирни // Энергетик. 2021. № 8. С. 41-44.

5. Буров В.Д., Дорохов Е.В., Елизаров Д.П. Тепловые электрические станции. М.: МЭИ, 2005. 454 с.

6. Пат. 2704364 Российская Федерация, МПК F01K23/10. Парогазовая установка электростанции / Кудинов А.А., Зиганшина С.К., Демина Ю.Э.; заявл. 09.07.18; опубл. 28.10.19, Бюл. № 31. 5 с.

7. Демина Ю.Э. Повышение эффективности работы ТЭС за счет использования тепла оборотной

воды // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии [Электронный ресурс]: сборник статей 78-й Всероссийской научно-технической конференции / под ред. М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. С. 728-733.

8. Wilcox D. Turbulens modeling for CFD. – San Diego: DWC Industries, 2006. 515 p.

9. Кудинов А.А. Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 2008. 368 с.

10. Schlichting H., Gersten K. Boundary-Layer Theory. – Luxembourg: Springer, 2017. 805 p.

11. NIST-JANAF. Thermochemical tables. NIST Standard Reference Database 13. 1998. DOI: 10.18434/T42S31.

12. Sutherland W. (1893). The viscosity of gases and molecular force. Philosophical Magazine, Vol. 5 (36), pp. 507-531.

REFERENCES

1. Ob energeticheskoy strategii Rossii na period do 2035 goda: Rasporyazhenie Pravitelstva RF [On the Energy Strategy of Russia for the period up to 2035: Order of the Government of the Russian Federation], 2020, no. 1523-p.

2. Kudinov A.A., Demina Yu.E. Calculation of the drainage system of leaving flue gases from the turbine through the cooling tower. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2018, vol. 8, no. 1, pp. 135-138. (in Russian) DOI 10.17673/Vestnik.2018.01.23.

3. Balandina O.A., Puring S.M. Research of influence of air temperature on the level of nitrogen oxides in smoke gases of boiler plants. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2019, vol. 9, no. 4, pp. 27-32. (in Russian) DOI 10.17673/Vestnik.2019.04.5.

4. Ziganshina S.K., Kudinov A.A., Demina Yu.E. Increasing the efficiency of the CCP-200 Syzran CHP by removing the exhaust gases in the waste heat boiler to the atmosphere through the exhaust cupola of the cooling tower. *Energetik* [Power engineer], 2021, no 8, pp. 41-44. (in Russian)

5. Burov V.D., Dorohov E.V., Elizarov D.P. *Teplovye elektricheskie stantsii: uchebnik dlya vuzov* [Thermal power plants: college textbook]. Moscow, MEU, 2005. 454 p.

6. Kudinov A.A., Ziganshina S.K., Demina Yu.E., e.a. *Parogazovaya ustanovka elektrostantsii* [Combined cycle gas turbine of power plant]. Patent RF, no. 2704364, 2019.

7. Demina Yu.E. Increase in efficiency of power plant operation due to the use of recycled water heat. *Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'stvo i stroitel'nye tekhnologii* [Elektronnyj resurs]: sbornik statej / pod red. M.V. Shuvalova, A.A. Pishchuleva, A.K. Strelkova [Tradition and innovation in construction and architecture. Building and construction technologies: a collection of articles / edited by M.V. Shuvalov, A.A. Pishchulev, A.K. Strelkov]. Samara, SamGTU, 2021, pp. 728-733. (in Russian)

8. Wilcox D. Turbulens modeling for CFD. San Diego, DWC Industries, 2006. 515 p.

9. Kudinov A.A. *Tekhnicheskaya gidromekhanika: ucheb. Posobie. Dlya vuzov* [Hydraulics: manual for graduate students]. Moscow, Mashinostroenie, 2008. 368 p.

10. Schlichting H., Gersten K. Boundary-Layer Theory. Luxembourg, Springer, 2017. 805 p.

11. NIST-JANAF. Thermochemical tables. NIST Standard Reference Database 13. 1998. DOI: 10.18434/T42S31

12. Sutherland W. The viscosity of gases and molecular force. Philosophical Magazine, 1893, vol. 5 (36), pp. 507-531.

Об авторах:

ДЕМИНА Юлия Эрнестовна

старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: demina.ye@samgtu.ru

DEMINA Yulia E.

Senior Lecturer of the of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation Samara State Technical University, Academy of Civil Engineering and Architecture 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: demina.ye@samgtu.ru

КУДИНОВ Анатолий Александрович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры тепловых электрических станций Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: a.a.kudinov@yandex.ru

KUDINOV Anatolii A.

Doctor of Engineering Sciences, associate Professor, Professor of the Department of the thermal power plants Samara State Technical University, 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: a.a.kudinov@yandex.ru

Для цитирования: Демина Ю.Э., Кудинов А.А. Защита от обмерзания устья вытяжной башни градирни с естественной тягой // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 3. С. 170–175. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.24.

For citation: Demina Yu.E., Kudinov A.A. Frost Protection of the Mouth of the Exhaust Tower of the Cooling Tower with Natural Draft. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2022, vol. 12, no. 3, pp. 170–175. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.24.