

## Экспериментальное исследование неоднородности процесса охлаждения воды в башенной градирне

А.И. Бадриев<sup>1</sup>, В.Н. Шарифуллин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУВО «Казанский федеральный университет», г. Казань, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: aibadriev@gmail.com; vilen44@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Ухудшение охлаждающей способности градирен приводит к снижению эффективности работы технологического оборудования и механизмов производства. Резерв охлаждающей способности особенно необходим в летнее время года, при высоких температурах воздуха, поступающего в аппарат. Согласно опубликованным данным, проблеме недоохлаждения воды в градирнях посвящен широкий круг исследований, направленных на совершенствование конструктивных и режимных параметров. Однако недостаточно изучено влияние характера распределения потока воды на эффективность ее охлаждения в аппарате. Поскольку испарительным градирням, как большим сооружениям, свойственны неравномерности распределения фаз, возникают задачи оценки величины неравномерности распределения плотности орошения по сечению градирни, выявления влияния неравномерности на эффективность охлаждения воды в аппарате, а также построения рабочей характеристики градирни для оценки ее эффективности в процессе эксплуатации с учетом неравномерности.

**Материалы и методы:** Учет неравномерности распределения плотности орошения в башенной градирне осуществлен с помощью статистической функции распределения.

**Результаты:** Экспериментально установлена значительная неравномерность плотности орошения по сечению башенной градирни. Разработан статистический метод оценки влияния степени неравномерности на общий коэффициент массоотдачи процесса испарения. На основании статистического метода оценки влияния неравномерности на интенсивность процесса установлено, что с увеличением неравномерности распределения плотности орошения скорость массопереноса снижается. Построена рабочая характеристика, учитывающая неравномерность орошения, с помощью которой можно определить охладительную мощность башенной градирни. Предложен способ оценки рабочей характеристики башенной градирни, основанной на неравномерности плотности орошения по секциям.

**Выводы:** При проектировании и эксплуатации градирен для более точного расчета аппарата важно знать закон распределения плотности орошения и рабочую характеристику для оценки ее эффективности. Устранение неравномерности плотности орошения является резервом повышения эффективности аппарата.

**Ключевые слова:** градирня, неравномерность, плотность орошения, массоперенос, рабочая характеристика, охладительная мощность, повышение эффективности.

## Experimental study of water cooling irregularity in the natural draft cooling tower

A.I. Badriev<sup>1</sup>, V.N. Sharifullin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

<sup>2</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

E-mail: aibadriev@gmail.com; vilen44@mail.ru

### Abstract

**Background:** Deterioration of cooling abilities of cooling towers leads to a decrease in the efficiency of the technological and production equipment. Cooling capacity reserve is especially important in summer when the inflowing air is hot. According to the published data, the problem of insufficient water cooling in cooling towers has been the subject of a wide range of studies aimed at improving design and operation parameters. However, there is still not enough data about the effect of water flow distribution on the water cooling efficiency in the apparatus. Evaporative cooling towers as large installations are characterized by uneven phase distribution, which makes it necessary to determine the value of unevenness of spraying density distribution over the cross section of the cooling tower and the unevenness influence on the water cooling efficiency in the apparatus, as well as to plot the cooling tower performance curve in order to determine its efficiency taking into account the unevenness.

**Materials and methods:** We suggest accounting for the unevenness of the spraying density distribution in a cooling tower by using the static distribution function.

**Results:** It has been experimentally determined that there is significant unevenness of spraying density distribution over the cooling tower cross section. A statistical method has been developed for estimating the influence of the unevenness on the overall mass transfer coefficient of the evaporation process. Based on the statistical method of assessing the unevenness impact on the process intensity, it has been found that the higher is the value of spraying density distribution unevenness, the slower is the mass transfer. A performance curve has been plotted taking into account the spraying unevenness that can be used to determine the cooling capacity of the cooling tower. A method has been suggested to determine the performance of a cooling tower based on spraying density uneven distribution over cross sections.

**Conclusion:** When designing and operating cooling towers, it is essential to know the law of spraying density distribution – to make calculations more precise – and performance – to assess its efficiency. Elimination of spraying density unevenness is a reserve for increasing the apparatus efficiency.

**Key words:** cooling tower, unevenness, spraying density, mass transfer, performance, cooling capacity, efficiency improvement.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2016.6.015-020

**Состояние вопроса.** Градирни применяются для охлаждения оборотной воды в разных отраслях промышленности: энергетической, металлургической, нефтеперерабатывающей и др. Ее температурный режим во многом определяет эффективность производства. На энергетических предприятиях от него зависит температура конденсации пара, выходящего из турбины, а также глубина вакуума в конденсаторе и коэффициент полезного действия турбоагрегата. Например, повышение температуры конденсации пара влечет за собой снижение термического коэффициента полезного действия турбины. Таким образом, повышение температуры охлаждающей воды понижает мощность турбины [1]. Проблемы недоохлаждения особенно проявляются в летний период, при высоких температурах атмосферного воздуха, поступающего в аппарат.

Известная крупномасштабность башенных градирен является главным условием достижения необходимой естественной тяги и в то же время причиной неоднородности процессов. Возникающие неравномерности жидкой и газовой фаз приводят к образованию бесконтактных зон, являющихся причиной уменьшения поверхности теплообмена и, следовательно, понижения эффективности всего аппарата [1, 2]. Для учета неравномерности орошения воды предлагаются разнообразные подходы, ориентированные на оценку величины неравномерности распределения локального поля плотности орошения. Например, в [2] приводится способ учета неравномерности орошения, который ограничивается оценкой неравномерности в пределах единичной форсунки. При этом необходимо принимать во внимание направление факела форсунки – вверх или вниз, вследствие чего появляются дополнительные расчеты. Аналогично вышеуказанному способу, в [4] выдвинуто решение об учете неравномерности орошения одной форсунки и, согласно принятым ограничениям, дополнительном учете диа-

метра капель, к тому же, решение предложено только при попутном течении жидкой и газовой фаз. Вместе с тем интересным представляются работы [7, 10], направленные на исследование выявления неравномерности орошения с помощью CFD моделирования, однако, подобно предыдущим способам, только в пределах единичной форсунки. При определении величины неравномерности всего аппарата, т. е. по сечению градирни, это приводит к возникновению громоздких вычислений. Например, у башенной градирни БГ-2600 общее количество форсунок составляет 2616 шт. Очевидно, что на практике это вызывает сложности в расчетах и не позволяет отразить реальную картину распределения орошения всей градирни. Кроме того, учет неравномерности распределения орошения выполняется не во всем объеме аппарата. Например, в [5] предлагается учитывать и распределять равномерно жидкость только по объему оросителя [5]. В [8] предложено решение об учете неравномерности плотности орошения с помощью коэффициента неравномерности по длине трубопровода водораспределительной системы. С помощью перечисленных способов сложно получить полное представление оценки величины распределения орошения в градирне. При рассмотрении вопроса о влиянии неравномерности орошения на интенсивность процесса обычно оценку выполняют с помощью программ моделирования [6, 9], но они требуют тщательной и кропотливой подготовки к моделированию процесса в силу необходимости разделить аппарат на секторы с одинаковой плотностью орошения, а далее суммировать полученные результаты. Эти причины приводят к возникновению задач оценки величины неравномерности распределения потока и оценки влияния этой неравномерности на процесс испарения в аппарате более простым и доступным способом.

**Материалы и методы.** Рассмотрим анализ неравномерности распределения плотности

орошения по сечению градири, влияние этой неравномерности на массоперенос, а также порядок построения рабочей характеристики градири для оценки ее эффективности в процессе эксплуатации с учетом неравномерности.

Анализ неравномерности плотности орошения проводился на примере башенной градири БГ-2600 площадью орошения 2600 м<sup>2</sup>. Схематичное изображение градири по сечению представлено на рис. 1.

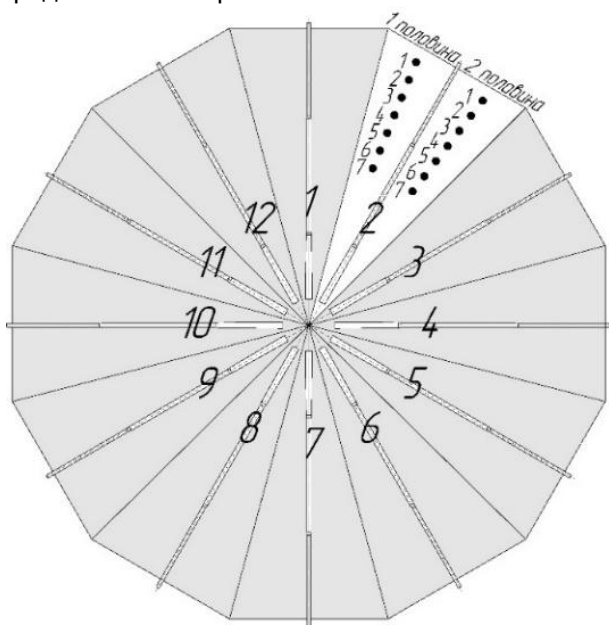


Рис. 1. Схематичное изображение градири по сечению

Водораспределительное устройство аппарата образует 12 секций распределения охлаждаемой воды. В каждой половине секции подоросительного пространства градири замерялось время наполнения водой цилиндрической мензурки емкостью 1000 мл и высчитывалась плотность орошения. Для наглядности на рис. 1 выделена секция №2 и указаны принадлежащие 1-й и 2-й половине секции точки замеров плотности орошения. Аналогичным образом проведены замеры плотностей орошения в остальных секциях. Для каждой точки проводилось 3–4 параллельных опыта. Результаты эксперимента в точках хорды каждой секции представлены на рис. 2.

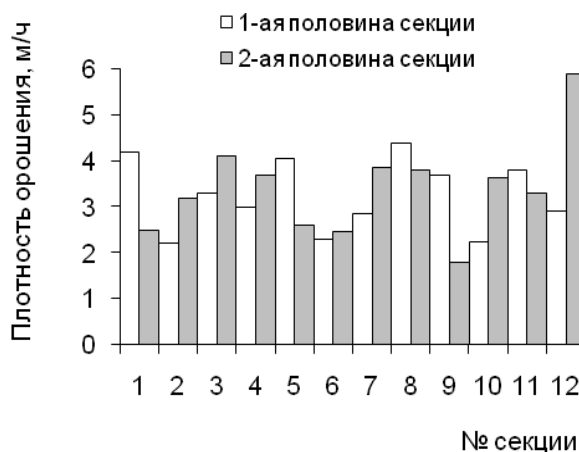


Рис. 2. Распределение плотности орошения по секциям градири (значения, соответствующие разным секциям, показаны разными цветами)

Согласно полученным данным, плотности орошения в разных секциях отличаются до 3-х раз. Средняя плотность орошения по хорде секций составила 2,87 м/ч, среднеквадратичное отклонение – 0,97 м/ч или 33 % от среднего значения. Таким же образом плотность орошения замерялась в точках радиуса каждой секции. На рис. 3 для примера показано распределение орошения в двух соседних секциях.

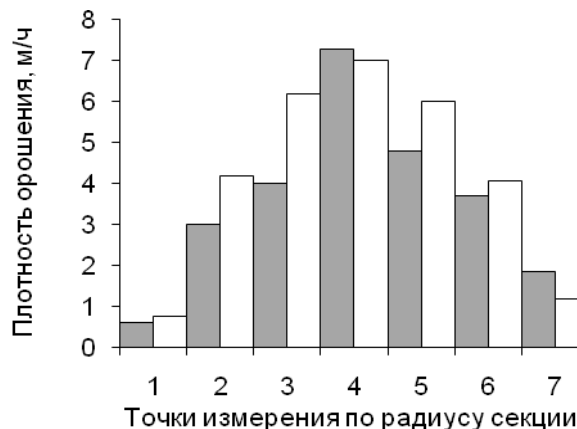


Рис. 3. Распределение орошения по радиусу в 2-х секциях

Плотность орошения по краям секции от плотности орошения в центре по радиусу секций отличается до 7 раз. Среднеквадратичное отклонение может составить до 2,5 м/ч. С помощью статистической сводки и группировки полученного распределения плотности орошения по хорде и по радиусу секций экспериментальный материал был объединен в одной гистограмме статистической плотности распределения орошения, представленной на рис. 4.

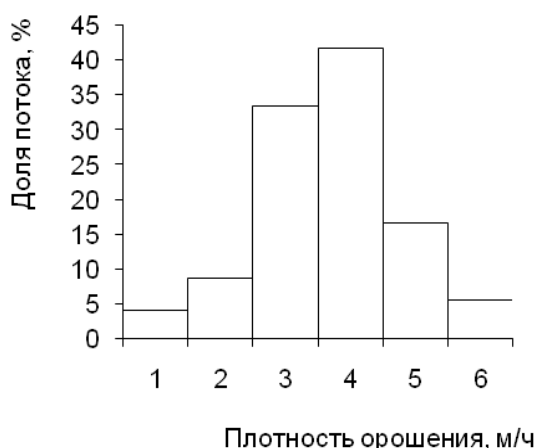


Рис. 4. Статистическая плотность распределения орошения

Следовательно, средняя плотность орошения градирни составила 3,4 м/ч, среднеквадратичное отклонение – 1,2 м/ч или 30 % от среднего значения. Согласно этой гистограмме подобран теоретический закон распределения, в качестве которого выбран нормальный закон распределения. Метод проверки статистических гипотез и критерий согласия Пирсона подтвердили применение нормального закона для данного экспериментального распределения [3]. Такой разброс должен отражаться на эффективности градирни.

Рассмотрим характер влияния неравномерности плотности орошения на интенсивность процесса. В качестве показателя интенсивности процесса принят коэффициент массопереноса, поскольку преимущественным процессом в летнее время года является массоперенос влаги в воздушную среду. Для анализа данного процесса разработан способ, основанный на методах математической статистики.

Если принять плотность орошения за непрерывную случайную величину, изменяющуюся от 0 до максимальной  $w$ , то неравномерность орошения можно учитывать статистической функцией  $f(u)$ . Тогда средняя плотность орошения  $U$  по сечению градирни находится по формуле [3]

$$U = \int_0^w u \cdot f(u) du. \tag{1}$$

Согласно теории массопередачи, от расхода жидкости зависит удельная поверхность контакта фаз и поверхностный коэффициент массоотдачи в газовой среде, произведением которых является коэффициент массопереноса. Тогда коэффициент массопереноса  $h$  можно выразить в форме степенной зависимости от плотности орошения:

$$h = Bu^n, \tag{2}$$

где  $B$  – постоянная величина;  $n$  – эмпирический показатель степени.

Средний коэффициент массопереноса для всего аппарата  $H$  с учетом неравномерности плотности орошения определяется по формуле

$$H = \int B u^n \cdot f(u) du. \tag{3}$$

На практике зависимость коэффициента массопереноса всего аппарата определяется относительно средней плотности орошения  $U$  и выражается через эмпирический показатель степени  $m$ :

$$H = B U^m. \tag{4}$$

Показатель степени  $m$  – это мера эффективности массоотдачи в градирне, определяется на основании полученных формул (1)–(4) по выражению

$$m = \frac{\ln \int u^n \cdot f(u) du}{\ln \int u \cdot f(u) du}. \tag{5}$$

По (5) можно проанализировать связь закона распределения и интенсивности массоотдачи. При нормальном законе распределения плотности орошения:

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \exp\left[-\frac{(u-U)^2}{2\sigma^2}\right], \tag{6}$$

если показатель степени при плотности орошения  $n = 0,8$  и плотность орошения  $U = 1,5$  м/ч, показатель интенсивности массоотдачи  $m$  зависит от дисперсии неравномерного распределения  $\sigma^2$  следующим образом: при увеличении дисперсии интенсивность массопереноса снижается (см. таблицу).

Отношение дисперсии распределения к интенсивности процесса

$n$	$U, \text{ м/ч}$	$\sigma, \text{ м/ч}$	$m$
0,8	1,5	1,2	0,38
		1,0	0,57
		0,5	0,77
		0	0,8

На следующем этапе для определения эффективности градирни при температуре наружного воздуха 25–31 °С в летнее время были замерены перепады температур  $\Delta T$  в четырех разных точках замеров плотностей орошения  $q$  секций аппарата. Согласно полученным данным, предложен упрощенный способ оценки рабочей характеристики градирни, основанный на неравномерности плотности орошения по ее секциям. Таким образом, построена зависимость перепада температур охлаждаемой воды от гидравлической нагрузки. Если принять с большей вероятностью, что секции идентичны друг другу, то полученные

данные можно объединить для построения рабочей характеристики, изображенной рис. 5.

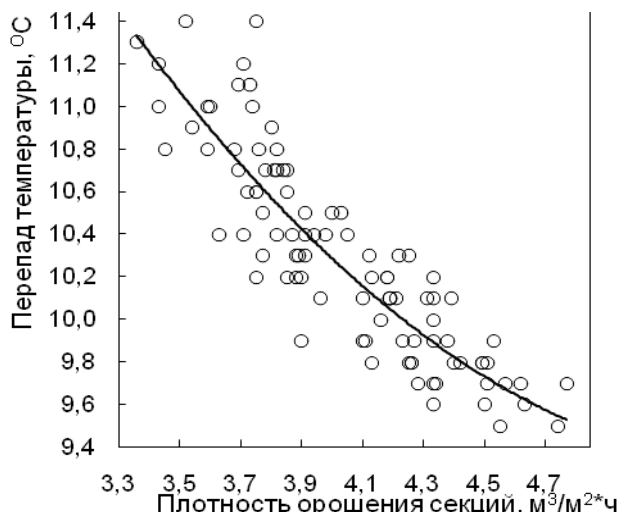


Рис. 5. Рабочая характеристика эффективности башенной градирни на основе неравномерности плотности орошения

Рабочая характеристика отражает охлаждающую мощность башенной градирни, а значит, ее эффективность.

**Результаты.** Полученные результаты свидетельствуют о значительной неравномерности распределения плотности орошения по сечению башенной градирни. Неравномерность оказывает существенное влияние на интенсивность процесса, а именно: с увеличением дисперсии распределения скорость массопереноса снижается.

**Выводы.** При проектировании и эксплуатации градирен для более точного расчета важно знать закон распределения плотности орошения. С помощью оценки рабочей характеристики, основанной на неравномерности орошения, можно анализировать охлаждающую мощность башенной градирни. Устранение неравномерности орошения является резервом повышения эффективности аппарата.

#### Список литературы

1. **Берман Л.Д.** Испарительное охлаждение циркуляционной воды. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 440 с.
2. **Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И.** Градирни промышленных и энергетических предприятий: справочное пособие / под ред. В.С. Пономаренко. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
3. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
4. **Братута Э.Г., Ганжа А.Н., Боровок С.В.** Влияние неравномерности распределения дискретной фазы на тепломассообмен в дисперсном потоке // Вестник НТУ ХПИ: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2004. – №11. – С. 37–42.

5. **Пушнов А.С.** О равномерности распределения жидкости в тепло- и массообменных аппаратах с регулярной насадкой // Химическая промышленность. – 2008. – Т. 85, № 8.

6. **Williamson N., Armfeld S., Behnia M.** Numerical simulation of flow in a natural draft wet cooling tower – The effect of radial thermofluid fields // Applied Thermal Engineering. – February 2008. – Vol. 28, Issues 2–3. – P. 178–189.

7. **Zhang Guofang, Zheng Yuan, Chen Qian.** Water distribution below a single spray nozzle in a natural draft wet cooling tower // The 14th IFToMM World Congress. Taipei. Taiwan, October 25–30, 2015.

8. **Николаева О.С., Свердлин Б.Л., Пипиленко К.В.** Гидравлический расчет напорной водораспределительной системы градирни (на примере вентиляторной градирни Мутновской ГеоЭС) // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2010. – Т. 260. – С. 78–85.

9. **Klimanek A., Bialecki R., Ostrowski Z.** CFD two-scale model of a wet natural draft cooling tower // Numerical heat transfer. – 2010. – Vol. 57, Issue 2.

10. **Lin Xia, Hal Gurgenci, Deyou Liu, Zhiqiand Guan, Ling Zhou, Pei Wang.** CFD analysis of pre-cooling water spray system in natural draft dry cooling towers // Applied Thermal Engineering. – 2016. – 105. – P. 1051–1060.

#### References

1. Berman, L.D. *Isparitel'noe okhlazhdenie tsirkulyatsionnoy vody* [Evaporative cooling of circulating water]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1949. 440 p.
2. Ponomarenko, V.S., Arefev, Yu.I. *Gradirni promyshlennykh i energeticheskikh predpriyatii* [Cooling towers of industrial and energy companies]. Moscow, Energoatomizdat, 1998. 376 p.
3. Gmurman, V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow, Vysshaya shkola, 2003. 479 p.
4. Bratuta, E.G., Ganzha, A.N., Borovok, S.V. Vliyaniye neravnomernosti raspredeleniya diskretnoy fazy na teplo-massoobmen v dispersnom potoke [The impact of uneven distribution of the discontinuous phase on heat and mass transfer in a dispersed stream]. *Vestnik NTU «KhPI». Energeticheskie i teplotekhnicheskie protsessy i oborudovanie*, 2004, no. 11, pp. 37–42.
5. Pushnov, A.S. O ravnomernosti raspredeleniya zhidkosti v teplo- i massoobmennykh apparatakh s regul'yarnoy nasadkoy [Uniformity of liquid distribution in the heat and mass transfer devices with a regular nozzle]. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 2008, vol. 85, no. 8.
6. Williamson, N., Armfeld, S., Behnia, M. Numerical simulation of flow in a natural draft wet cooling tower – The effect of radial thermofluid fields. *Applied Thermal Engineering*. February 2008, vol. 28, issues 2–3, pp. 178–189.
7. Zhang, Guofang, Zheng, Yuan, Chen, Qian. Water distribution below a single spray nozzle in a natural draft wet cooling tower. The 14th IFToMM World Congress. Taipei. Taiwan. October 25–30, 2015.
8. Nikolaeva, O.S., Sverdlin, B.L., Pipilenko, K.V. Gidravlicheskiy raschet napornoy vodoraspredelitel'noy sistemy gradirni (na primere ventilyatornoy gradirni Muttovskoy GeoES) [Hydraulic calculation of the pressure water distribution system of a cooling tower (exemplified by the

cooling tower of Mutnovsky Geothermal Power Plant)]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva*, 2010, vol. 260, pp. 78–85.

9. Klimanek, A., Białecki, R., Ostrowski, Z. CFD two-scale model of a wet natural draft cooling tower. *Numerical heat transfer*, 2010, vol. 57, issue 2.

10. Lin, Xia, Hal, Gurgenci, Deyou, Liu, Zhiqiang, Guan, Ling, Zhou, Pei, Wang. CFD analysis of pre-cooling water spray system in natural draft dry cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105, pp. 1051–1060.

*Бадриев Айрат Ирекович,*  
ФГАОУВО «Казанский федеральный университет»,  
ведущий инженер-программист,  
e-mail: aibadriev@gmail.com

*Badriev Airat Irekovich,*  
Kazan Federal University,  
Leading Programming Engineer,  
e-mail: aibadriev@gmail.com

*Шарифуллин Вилен Насибович,*  
ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет»,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: vilen44@mail.ru

Sharifullin Vilen Nasibovich,  
Kazan State Power Engineering University,  
Doctor of Engineering, Professor,  
e-mail: vilen44@mail.ru