



## ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ВОДЫ И ВОЗДУХА НА ЛАБОРАТОРНОЙ ГРАДИРНЕ

А.И. Бадриев<sup>1\*</sup>, С.М. Власов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет,  
г. Казань, Россия

ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-6963-5149>, [aibadriev@gmail.com](mailto:aibadriev@gmail.com)

**Резюме:** установлено снижение эффективности башенной градирни ТЭС, особенно в летнее время года. Выдвинуто, что одной из причин снижения производительности могут стать неравномерности распределения потоков. Проведены натурные эксперименты по исследованию распределения плотности орошения воды и воздушного потока башенной градирни БГ-2600 тепловой электроцентрали. Получены фактические рабочие характеристики охлаждающего устройства с учётом неравномерности потоков. Ввиду влияния внутренних и внешних факторов на показатели натурной башенной градирни, проверены рабочие характеристики на её лабораторной установке. Выполнен экспериментальный анализ распределения плотности орошения и скорости воздуха на лабораторной модели градирни. Подтверждены полученные экспериментальным способом рабочие характеристики натурной башенной градирни на лабораторной установке: зависимости скорости воздуха, перепада температуры воды и охлаждающей мощности от распределения плотности орошения. Учёт неравномерности потоков воды и воздуха является важной задачей при проектировании и эксплуатации башенных градирен. Сформулирована проблема рационального распределения плотности орошения и воздушного потока в башенной градирне.

**Ключевые слова:** башенная градирня, лабораторная модель, рабочие характеристики, неравномерности потоков.

**Благодарности:** автор статьи выражает безмерную благодарность и светлую память научному руководителю д.т.н., профессору Шарифуллину В.Н.

**Для цитирования:** Бадриев А.И., Власов С.М. Оценка распределения потоков воды и воздуха на лабораторной градирне // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №5. С. 71-78. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-71-78.

## ESTIMATION OF THE DISTRIBUTION OF WATER AND AIR FLOWS IN A LABORATORY COOLING TOWER

AI Badriev<sup>1\*</sup>, SM Vlasov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan Federal University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-6963-5149>, [aibadriev@gmail.com](mailto:aibadriev@gmail.com)

**Abstract:** a decrease in the efficiency of the tower cooling tower of the TPP was found, especially in the summer. It has been proposed that one of the reasons for the decrease in productivity may be uneven distribution of flows. Experimental studies of the density distribution of irrigation water and air flow of a tower cooling tower have been carried out. The actual operating characteristics of the cooling device are obtained taking into account the uneven flow. Due to the influence of internal and external factors on the performance of the full-scale tower, it was decided to check the performance at its laboratory installation. An experimental analysis of the distribution of irrigation density and air velocity was performed on a laboratory model of a cooling tower. The experimental characteristics of the full-scale tower cooling tower in a laboratory installation were confirmed: the dependence of air speed,

*temperature drop of water and cooling power on the distribution of irrigation density. Taking into account the uneven flow of water and air is an important task in the design and operation of tower towers. The problem of rational distribution of irrigation density and air flow in a tower cooling tower is formulated.*

**Keywords:** *natural draft cooling tower, working characteristics, non-uniformity flows.*

**Acknowledgments:** *the author of the article expresses many thanks and cherished memory to the supervisor of studies, Doctor of Technical Sciences, Professor Sharifullin V.N.*

**For citation:** Badriev AI, Vlasov SM. Estimation of the distribution of water and air flows in a laboratory cooling tower. Power engineering: research, equipment, technology.2019;21(5):71-78. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-71-78.

### **Введение**

Эффективность работы башенных градирен во многом определяет расход условного топлива на производство электроэнергии, глубину вакуума в конденсаторах, а также мощность паровой турбины [1-3]. Однако, на производстве довольно часто сталкиваются с недоохлаждением воды в аппарате. Одной из причин снижения эффективности может стать возникновение неравномерности потоков в объеме башенной градирни [4]. Поэтому, актуальным явилось исследование эффективности охлаждения башенных градирен, работающих в условиях неравномерности распределения воды и воздуха.

### **Литературный обзор**

Для определения охлаждающей способности башенных градирен применяют номограммы. В зарубежной литературе, как правило, используют обобщенные номограммы, предназначенные для разных типов градирен [5]. Они являются своего рода универсальными, но не позволяют точно определить охлаждающую способность аппарата. Чтобы получить достаточно точные показатели эффективности, необходимо учитывать конструктивные параметры и предел охлаждения, а также принимать во внимание высоту башни, тип оросителя, способ потока воды (поперечный или противоточный). Так, в отечественной литературе, с учётом конструктивных особенностей, для башенных градирен нормативные характеристики предложено строить, например, по методике [6]. Это позволяет получить нормативные характеристики, соответствующие конкретному типу башенной градирни. Тем не менее, в процессе эксплуатации, конструктивные элементы башенных градирен подвергаются разрушению, что может стать причиной явления неравномерности потоков и, значит, спада эффективности аппарата.

Проанализировать неравномерности распределения воды и воздуха можно с помощью рабочих характеристик башенной градирни [7]. Однако, ввиду воздействия внешних и внутренних факторов на натурные измерения аппарата, возникает необходимость подтверждения построенных рабочих характеристик. Поэтому, целью работы стала проверка рабочих характеристик башенной градирни, полученных в условиях неравномерности потоков воды и воздуха, на лабораторной установке [7, 8].

### **Материалы и методы**

На первом этапе проведены натурные экспериментальные измерения скорости воздуха башенной градирни БГ-2600, при температуре атмосферного воздуха от 25 до 31 °С. Каждая секция башенной градирни была разбита на участки, в которых произведены измерения скоростей воздуха. Проведены три параллельных эксперимента, с помощью поверенного анемометра АТТ-1004. В результате, получено как посекционное, так и радиальное распределение воздушного потока [8, 9]. Обработка экспериментальных данных показала, что существует неравномерность в размере 20,8 % при средней скорости воздуха 2,16 м/с.

С целью выявления причин возникновения установленной неравномерности воздуха, принято выполнить эксперимент распределения орошения воды в башенной градирне. Так, проведены 3 параллельных эксперимента по замеру плотности орошения воды в секциях аппарата. Эксперимент основывался на измерениях времени наполнения емкости водой, что позволило рассчитать плотности орошения в каждой секции башенной градирни. Был собран большой статистический материал, при котором установлена неравномерности плотности орошения воды по секциям в размере 33 % от среднего

значения  $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ .

Экспериментальные исследования распределения воздушного потока и орошения воды позволили установить их связь. В результате, построена регрессионная зависимость двух параметров – скорости воздуха и плотности орошения, в условиях их неравномерности распределения (рис. 1).

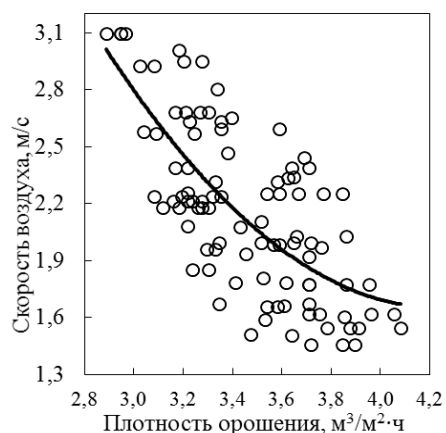


Рис. 1. Скорость воздуха при распределении орошения воды башенной градирни

Полученная рабочая характеристика башенной градирни описывается уравнением параболического типа с коэффициентом корреляции 0,53:

$$w = 0,44 \cdot q^2 - 3,66 \cdot q + 8,65, \quad (1)$$

где  $w$  – скорость воздуха, м/с;  $q$  – плотность орошения башенной градирни,  $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ .

Как видно, коэффициент корреляции установленной зависимости распределения воды и воздуха свидетельствует об умеренной степени связи. Предположительно, это может быть связано с тем, что на распределение воздуха влияют и другие немаловажные факторы, например, скорость ветра, гидродинамическое сопротивление, конструктивные особенности градирни и т.д.

Для подтверждения установленной зависимости скорости воздуха и плотности орошения экспериментальным путём проведены исследования рабочих характеристик на лабораторной модели башенной градирни. Основным устройством лабораторной установки является пирамидальная башня с вентилятором, высотой 1,25 м и площадью орошения  $0,3 \text{ м}^2$  [10,11]. В масштабе, модель меньше натурной башенной градирни БГ-2600 в 51 раз (рисунок 2).



Рис. 2. Общий вид лабораторной установки

Лабораторная установка включает конструктивные элементы, из которых состоит башенная градирня: ороситель, устройство водораспределения, водосборный бассейн, воздухопроводные окна, каплеуловитель, циркуляционный насос, трубки конденсатора и систему подогрева трубок. Установка также оснащена приборами контроля температуры, расхода потоков воды и воздуха. Общая схема лабораторной установки представлена на рис. 3.

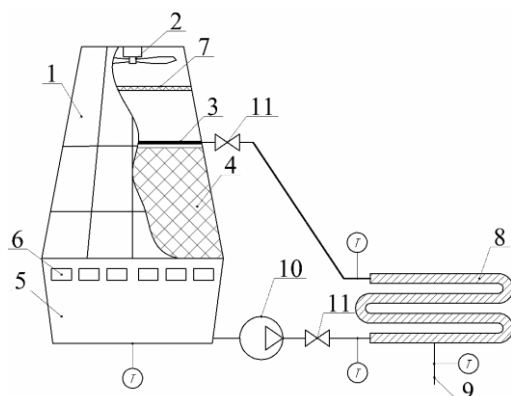


Рис. 3. Общая схема лабораторной установки УВО – 0,3, где:

- 1 – вытяжная башня; 2 – вентилятор; 3 – устройство водораспределения; 4 – ороситель;  
 5 – водосборный бассейн; 6 – воздухопроводные окна; 7 – каплеуловитель; 8 – трубки конденсатора;  
 9 – система подогрева трубок; 10 – циркуляционный насос; 11 – вентиль; Т – термомпара.

Методика эксперимента на лабораторной модели башенной градирни заключалась в следующем. Сначала, управлением циркуляционного насоса и системы подогрева трубок конденсатора, производилась подача охлаждаемой воды с температурой 30 °С. В процессе циркуляции воды в системе лабораторной установки проводились замеры скорости воздуха анемометром АТТ-1004. В каждом эксперименте, с помощью настроек скорости циркуляционного насоса и угла поворота вентиля, задавался расход воды и замерялся установившийся расход воздуха. Соотношения скорости и мощности насоса, угла поворота вентиля и расхода воды представлена в табл. 1.

Таблица 1

Регулирование подачи воды лабораторной установки

Скорость насоса	Мощность насоса, Вт	Угол поворота вентиля, °	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч
1	20	45	0,99
		90	1,08
		135	1,17
		180	1,26
2	40	45	1,35
		90	1,44
		135	1,53
		180	1,62
3	60	45	1,71
		90	1,80
		135	1,89
		180	1,98

В результате серии опытов на лабораторной модели, получены статистические данные скорости воздуха и плотности орошения, построена их регрессионная зависимость (рис. 4).

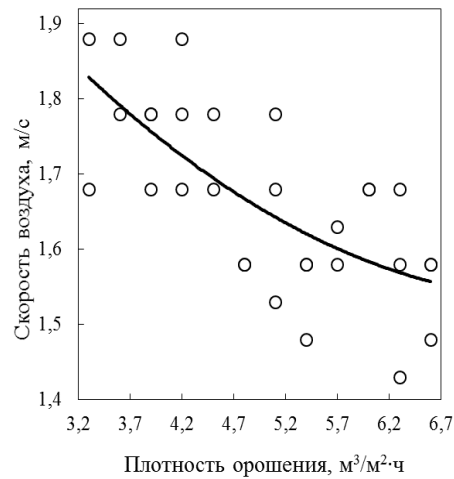


Рис. 4. Скорость воздуха при распределении орошения воды лабораторной установки

Так, аналогично эксперименту на башенной градирне, была получена характеристика параболического типа на лабораторной установке, которая описывается уравнением, с коэффициентом корреляции 0,51:

$$w_y = 0,014 \cdot q_y^2 - 0,22 \cdot q_y + 2,42, \quad (2)$$

где  $w_y$  – скорость воздуха, м/с;  $q_y$  – плотность орошения лабораторной установки,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

На следующем этапе решено проведена проверка характеристик при неравномерности орошения воды 33 %, отражающую влияние распределения плотности орошения на перепад температуры башенной градирни (рис. 5).

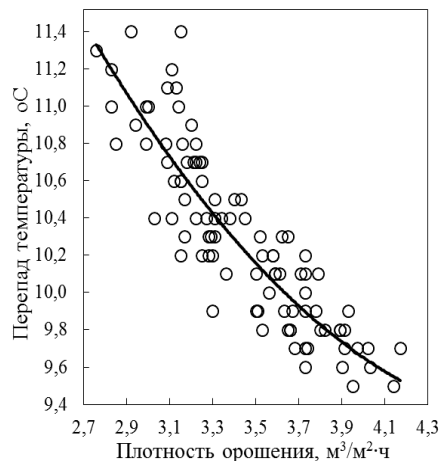


Рис. 5. Перепад температуры при распределении орошения воды башенной градирни

Уравнение регрессионной зависимости на рис. 6 представляется в виде выражения, с коэффициентом корреляции 0,78:

$$\Delta T = 0,46 \cdot q^2 - 4,46 \cdot q + 20,14, \quad (3)$$

где  $\Delta T$  – перепад температуры, °С;  $q$  – плотность орошения,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

Экспериментальные данные измерений перепада температур воды и плотности орошения позволили вычислить охлаждающую мощность по формуле  $R = q\Delta T$  и построить её зависимость с учётом неравномерности плотности орошения 33 % (рис. 6).

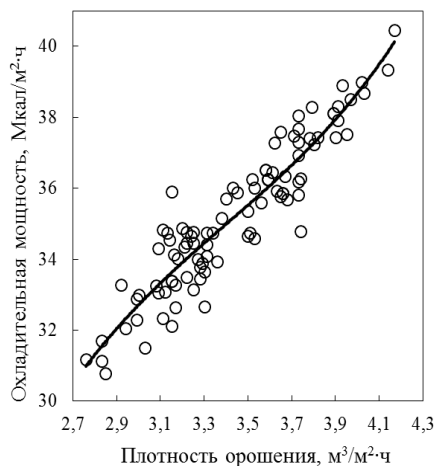


Рис. 6. Охлаждающая мощность при распределении орошения воды башенной градирни

В процессе замеров скорости воздуха, плотности орошения были выполнены и измерения температур воды на входе и выходе лабораторной установки. Таким образом, получена регрессионная зависимость параметров перепада температуры воды и распределения плотности орошения лабораторной установки (рис. 7).

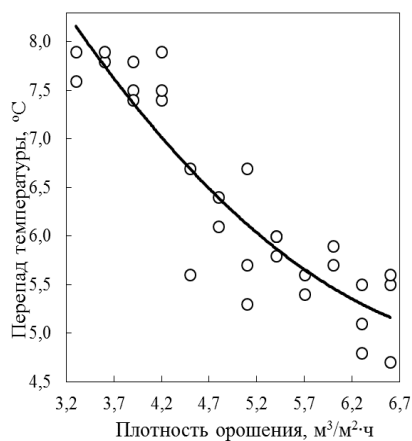


Рис.7. Перепад температуры воды при распределении плотности орошения лабораторной установки

Регрессионная модель зависимости перепада температуры от плотности орошения лабораторной установки с коэффициентом корреляции 0,83 выражается формулой

$$\Delta T = 0,15 \cdot q^2 - 2,4 \cdot q + 14,5 \quad (3)$$

где  $\Delta T$  – перепад температуры, °C;  $q$  – плотность орошения, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч.

Основываясь на экспериментальных данных замеров плотности орошения и перепада температуры воды, были рассчитаны значения охлаждающей мощности установки, построена регрессионная модель охлаждающей мощности при распределении плотности орошения (рис. 8).

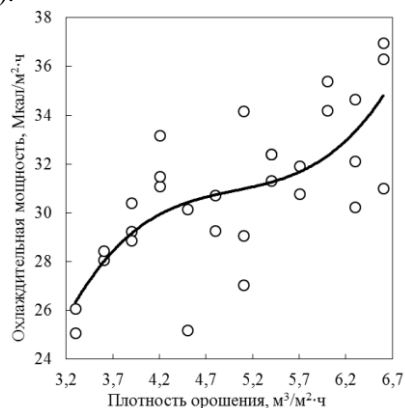


Рис.8. Охлаждающая мощность при распределении плотности орошения лабораторной установки

### **Результаты**

Сопоставляя характеристики перепада температуры, охлаждающей мощности башенной градирни и лабораторной установки, следует сделать вывод об их соответствии. Таким образом, получены подтверждения характеристик потока воздуха, перепада температуры воды, а также охлаждающей мощности башенной градирни на лабораторной установке при распределении плотности орошения.

### **Обсуждение**

Анализируя полученные регрессионные модели, стоит отметить высокую степень связи параметров перепада температуры и охладительной мощности при распределении плотности орошения воды башенной градирни и её лабораторной модели. Умеренную корреляцию отражают зависимости скорости воздуха при распределении орошения воды и башенной градирни, и её лабораторной модели, что объясняется влиянием других факторов на скорость воздуха в устройствах.

### **Заключение**

Рабочие характеристики позволят более точно управлять гидравлической нагрузкой и оценить эффективность охлаждения башенной градирни в условиях неравномерности потоков воды и воздуха. Сформулирована задача рационального распределения плотности орошения и воздушного потока в башенной градирне.

### **Литература**

1. Дмитриева О.С., Дмитриев А.В. Разработка новых градирен для увеличения энергоэффективности промышленных установок // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. №6. С. 134-136.
2. Сосновский, С.К., Кравченко В.П. Определение эффективности охлаждения циркуляционной воды в вентиляторных и башенных градирнях // Энергетика и электрификация. 2008. № 3. С. 37-41.
3. Мурадян А.К., Аршакян Д.Т. Исследование режимов работы и энергетических показателей энергоблоков при увеличении охладительного эффекта башенных градирен // Теплоэнергетика. 2007. № 11. С. 66-68.
4. Li X., Xia L., Gurgenci H., Guan Zh. Performance enhancement for the natural draft dry cooling tower under crosswind condition by optimizing the water distribution // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, vol. 107, pp. 271-280.
5. Singla R. K., Singh K., Das R. Tower characteristics correlation and parameter retrieval in wet-cooling tower with expanded wire mesh packing. Applied Thermal Engineering, 2016, vol. 96, pp. 240-249.
6. Калатузов В.А. Методика построения нормативных характеристик башенных градирен испарительного типа по результатам натурных изменений // Теплоэнергетика. № 11. 2007. С. 51-55.
7. Сосновский С. К. Оптимальные параметры работы градирен // Технологический аудит и резервы производства. 2012. № 5/1(7). С. 5-6.
8. Шарифуллин В.Н., Бадриев А.И. Аэродинамические характеристики башенной градирни в условиях неравномерности распределения потоков воды и воздуха // Теплоэнергетика. 2019. №8. С. 46-52.
9. Пушнов А.С., Рябушенко А.С. Компоновка оросителя градирни с учетом неравномерности поля скоростей воздушного потока // Теплоэнергетика. 2016. № 7. С. 74-79.
10. Власов С.М., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Власова А.Ю., Филимонова А.А. Разработка технологий стабилизационной обработки воды системы оборотного охлаждения ТЭС // Теплоэнергетика. 2018. № 2. С. 44-49.
11. Chichirova N.D., Chichirov A.A., Vlasov S.M. Analysis and design of technical water supply operation with cooling towers at the Naberezhnochelninsky power station // Труды Академэнерго. 2012. № 2. С. 66-75.

### **Авторы публикации**

**Бадриев Айрат Ирекович** – ассистент, Казанский федеральный университет. Email: aibadriev@gmail.com.

**Власов Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловые электрические станции» (ТЭС), Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Dmitrieva OS, Dmitriev AV. Development of new cooling towers to increase the energy efficiency of industrial plants. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014;17:6: 134-136.
2. Sosnovsky SK., Kravchenko VP. Determination of the efficiency of cooling circulating water in fan and tower cooling towers. *Energy and Electrification*. 2008;3:37-41.
3. Muradyan AK, Arshakyan DT. Investigation of operating modes and energy indicators of power units with an increase in the cooling effect of tower towers. *Thermal Engineering*. 2007;11:66-68.
4. Li X, Xia L, Gurgenci H, et al. Performance enhancement for the natural draft dry cooling tower under crosswind condition by optimizing the water distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;107:271-280.
5. Singla RK, Singh K, Das R. Tower characteristics correlation and parameter retrieval in wet-cooling tower with expanded wire mesh packing. *Applied Thermal Engineering*. 2016;96:240-249.
6. Kalatuzov VA. The methodology for constructing the regulatory characteristics of evaporative type cooling towers based on the results of field changes. *Thermal Engineering*. 2007;11:51-55.
7. Sosnovsky SK. Optimal parameters of cooling towers. *Technological audit and production reserves*. 2012;51(7):5-6.
8. Sharifullin VN, Badriev AI. Aerodynamic characteristics of a tower tower under conditions of uneven distribution of water and air flows. *Thermal Engineering*. 2019;8:46-52.
9. Pushnov AS, Ryabushenko AS. The layout of the cooling tower sprinkler, taking into account the unevenness of the field of air flow velocities. *Thermal Engineering*. 2016;7:74-79.
10. Vlasov SM, Chichirova ND, Chichirov AA, et al. Development of technologies for stabilization treatment of water in the reverse cooling system of thermal power plants. *Thermal Engineering*. 2018;2:44-49.
11. Chichirova ND, Chichirov AA, Vlasov SM. Analysis and design of technical water supply operation with cooling towers at the Naberezhnochelninsky power station. *Transactions of Academenergo*. 2012;2:66-75.

### Authors of the publication

**Ayrat I. Badriev** – Kazan Federal University, Kazan, Russia. Email: aibadriev@gmail.com.

**Sergey M. Vlasov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Поступила в редакцию*

*18 октября 2019г.*