

## РОЗДІЛ 3

ХОЛОДИЛЬНІ  
ТА СУПУТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.175.3

**М.М. Кологривов, В.П. Бузовский**

Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики ОНАПТ, ул. Дворянская, 1/3, Одесса, 65082

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНТАКТНЫХ АППАРАТОВ**

*В статье представлены результаты экспериментального исследования эффективности охлаждения воды в вентиляторных градирнях разных конструкций при относительных расходах воды и воздуха в широком диапазоне. Проведено сравнение полученных результатов с аналогичными характеристиками абсорберов.*

**Ключевые слова:** Градирня – Абсорбер – Эффективность процесса – Предельные нагрузки – Вязкость воды

**М.М. Кологривов, В.П. Бузовский**

Институт холоду, кріотехнологій та екоенергетики ОНАХТ, вул. Дворянська 1/3, м. Одеса, 65082

**ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ПРОМИСЛОВИХ КОНТАКТНИХ АПАРАТІВ**

*В статті представлені результати експериментального дослідження ефективності охолодження води в вентиляторних градирнях різних конструкцій при відносних витратах води і повітря в широкому діапазоні. Проведено порівняння отриманих результатів з аналогічними характеристиками абсорберів.*

**Ключові слова:** Градирня – Абсорбер – Ефективність процесу – Граничні навантаження – В'язкість води

**I. ВВЕДЕНИЕ**

Широко применяемым методом определения рабочих характеристик контактных промышленных аппаратов является метод коэффициентов эффективности. Модель аппарата рассматривается в виде «чёрного ящика», так как датчики расходов потоков, температур, давлений и концентраций размещают на входе и выходе. В качестве контактных аппаратов рассмотрим градирни и абсорберы, которые работают при разных схемах движения потоков: противоток, прямоток, поперечный ток, полное перемешивание, частичное перемешивание.

Эффективность работы градирен оценивается по степени охлаждения воды

$$E_{ж} = \frac{Q_p}{Q_{ид}} = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{t_{ж1} - t_{м1}} \quad (1)$$

где  $Q_p$ ,  $Q_{ид}$  – мощности тепловых потоков, которые отводятся от одинаковых расходов воды в реальной и идеальной градирнях соответственно;

$t_{ж1}$ ,  $t_{ж2}$  – температуры воды на входе и выходе из градирни;

$t_{м1}$ ,  $t_{м2}$  – температура воздуха по мокрому термометру на входе и выходе из градирни.

Разность температур ( $t_{ж1} - t_{м1}$ ) в знаменателе выражения (1) является максимально достигаемой (идеальной) при бесконечной поверхности контакта фаз. Эта модель идеальной градирни не учитывает расход воздуха, который проходит через рабочую зону аппарата и не учитывает его эффективное использование. На практике показатель  $E_{ж}$

широко применяют для анализа работы. Его значение лежит в диапазоне от нуля до единицы. Чем больше  $E_{ж}$ , тем лучше работает градирня.

Вторая модель противоточной «идеальной» градирни характеризуется температурным равновесием на входе и выходе потоков из аппарата, когда

$$t_{ж1} = t_{м2} \quad \text{и} \quad t_{ж2} = t_{м1} \quad (2)$$

В этой модели максимальное охлаждение воды достигается за счёт эффективного её взаимодействия с воздухом, минимально допустимого расхода.

Для оценки работы градирни используют характеристическое число  $\lambda$ , которое представляет собой произведение отношений расходов потоков в реальном и идеальном случаях

$$\lambda = \left[ \left( \frac{Q_p}{G_r} \right) / \left( \frac{Q_p}{G_{ж}} \right) \right] \times \left[ \left( \frac{Q_{ид}}{G_{ж}} \right) / \left( \frac{Q_{ид}}{G_{мин}} \right) \right] \quad (3)$$

где  $G_r$ ,  $G_{мин}$  – массовые расходы воздуха через реальный и идеальный аппараты соответственно.

$G_{ж}$  – массовые расходы воды через реальный и идеальный аппараты.

С другой стороны

$$\frac{G_r}{G_{ж}} = \frac{C_{ж} \times (t_{ж1} - t_{ж2})}{h_2 - h_1 - C_{ж} \times t_{ж2} \times (x_2 - x_1)} \quad (4)$$

$$\frac{G_{мин}}{G_{ж}} = \frac{C_{ж} \times (t_{ж1} - t_{м1})}{h_{гж1} - h_1 - C_{ж} \times t_{м1} \times (x_{гж1} - x_1)} \quad (5)$$

где  $C_{ж}$  – удельная теплоёмкость воды;

$h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_{гж1}$  – удельные энтальпии воздуха при температурах на входе и выходе из градирни соответ-

ственно, а также при температуре воды на входе в градирню.

$x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_{гж1}$  – влагосодержания воздуха на входе и выходе из градирни, а также насыщенного парама воздуха при температуре воды на входе в градирню.

Выражение (5) называется «относительно минимальным расходом воздуха», поскольку при его меньших значениях не может быть достигнуто равенство  $t_{ж2} = t_{м1}$ , даже при бесконечно большой поверхности контакта фаз в аппарате. Выражение (3) с учётом (4) и (5) можно представить (6)

$$\lambda = \frac{\left( \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{t_{ж1} - t_{м1}} \right) \div \left[ \frac{h_2 - h_1 - C_{ж} \times t_{ж2} (x_2 - x_1)}{h_{гж1} - h_1 - C_{ж} \times t_{м1} \times (x_{гж1} - x_1)} \right]}{E_{г}} = \frac{E_{ж}}{E_{г}} \quad (7)$$

$$E_{г} = \left[ \frac{h_2 - h_1 - C_{ж} \times t_{ж2} \times (x_2 - x_1)}{h_{гж1} - h_1 - C_{ж} \times t_{м1} \times (x_{гж1} - x_1)} \right] \approx \frac{h_2 - h_1}{h_{гж1} - h_1} \quad (7)$$

Выражение (7) называют «степенью использования воздуха». Это отношение реальной тепловой нагрузки, которая воспринята воздухом, к максимально возможной (в идеальном аппарате). Значение  $E_{г}$  лежит в диапазоне от 0 до 1, а значение характеристического числа  $\lambda$  от 0 до  $\infty$ .

$$E_{ж} = E_{г} \times \lambda \quad (8)$$

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ

На производстве определение степени использования воздуха ( $E_{г}$ ) в градирни по значению мокрого термометра затруднительно. Замеры температуры приближенные из-за разрешённого капельного уноса воды из аппарата ( $\approx 0,2$  %) и существенной неравномерности воздушного потока по сечению.

Для расчёта эффективности охлаждения воды в градирни при любых тепловых и гидравлических нагрузках, а также любых параметрах окружающей среды рекомендуют применять характеристическое число  $\lambda$ , в котором отражены две идеальных модели. Расчёт  $\lambda$  выполняется по заданным расходам воды и воздуха и известной температуре окружающей среды по мокрому термометру.

Работа градирни при различных внешних условиях эксплуатации описывается зависимостью вида  $E_{ж} = f(\lambda)$  с использованием эмпирических показателей и коэффициентов, которые учитывают конструкцию градирни и особенности теплового взаимодействия аппарата с окружающей средой.

Разными исследователями было предложено несколько видов зависимостей  $E_{ж} = f(\lambda)$ . Все они представляют собой эмпирические выражениями. На наш взгляд зависимость (9) наиболее красива

$$E_{ж} = C \times \left( 1 - e^{-a \times \lambda} \right) \quad (9)$$

где «с» – коэффициент, который является пределом для значений  $E_{ж}$  при больших числах  $\lambda$  и который связан с влиянием теплового взаимодействия промышленного аппарата и окружающей среды;

«а» – сомножитель, который характеризует конструкцию аппарата и организацию движения потоков воды и воздуха в нём.

Если известны «с» и «а», то можно быстро и легко рассчитать эффективность работы градирни при любых исходных данных.

В большинстве случаев рабочий диапазон чисел  $\lambda$  охватывает значения от 0,5 до 3,0. В этом диапазоне работу конкретной градирни удовлетворительно описывает одно из известных выражений в соответствии с конструкцией. Для другой конструкции и схемы организации потоков необходимо использовать иную зависимость. Открытым и неосвящённым остаётся вопрос об изменении эффективности работы ( $E_{ж}$ ) промышленного аппарата при числах  $\lambda$  меньше 0,5 и больше 3.

Нами [1] по результатам промышленных и лабораторных испытаний градирен различных конструкций (вентиляторные с разными насадками), которые были разработаны в ОГАХ под руководством проф. Дорошенко А.В., выявлено следующее. При относительно расходах воды ( $G_{ж} / G_{г}$ ) в три и более раз или при относительно больших расходах воздуха ( $G_{ж} / G_{г}$ ) влияние конструкции аппарата на эффективность охлаждения воды уменьшается. При значениях  $\lambda$  меньше 0,1 и больше 10 влияние конструкции аппарата и схемы организации потоков в нём на значение эффективности его работы можно не учитывать.

Характер изменения степени охлаждения воды в широком диапазоне чисел  $\lambda$  показан на рисунке 1.

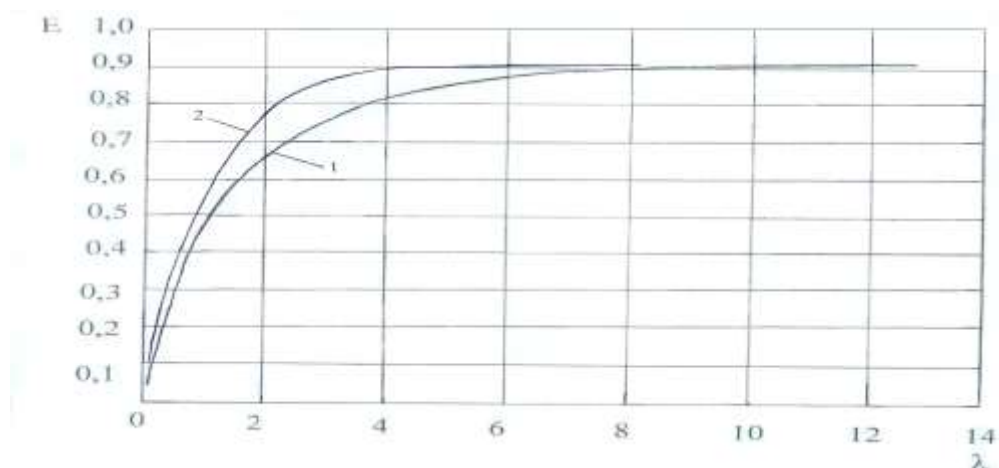
В промышленных градирнях истинный характер взаимодействия потоков существенно отличается от идеализированных схем: противоток, прямоток, поперечный ток, полное перемешивание, частичное перемешивание. Для понимания сути наблюдаемого явления необходимо экспериментальное изучение внутренней структуры потоков в аппаратах вне рабочего диапазона нагрузок: эффектов продольного и поперечного перемешивания, вторичного уноса, эффекта масштабного перехода, изменение локальной порозности газожидкостной структуры по объёму. Сложность решения этой производственной проблемы подчеркивают графики, которые приведены на рисунке 2.

Работа градирни типа ГПН на оборотной воде с разной средней температурой, неизменных массовых расходах воды и воздуха, значениях температур окружающего воздуха по мокрому термометру характеризуется разной эффективностью при одних и тех же значениях характеристического числа. Это противоречит вышеизложенной методике анализа работы градирен. Следует учитывать значительное влияние на организацию движения потоков в промышленной градирне реологические свойства жидкости (вязкость воды). Это не учитывается в вышеизложенной методике. На рис. 2 коэффициенты кинематической вязкости воды в м<sup>2</sup>/с составили:  $1,1 \cdot 10^{-6}$ ;  $0,9 \cdot 10^{-6}$ ;  $0,74 \cdot 10^{-6}$  (соответственно верхняя, средняя и нижняя кривые). Например, при работе градирни ГПН с характеристическим числом равным единице эффективность её работы соответственно составит: 0,48; 0,44; 0,415.

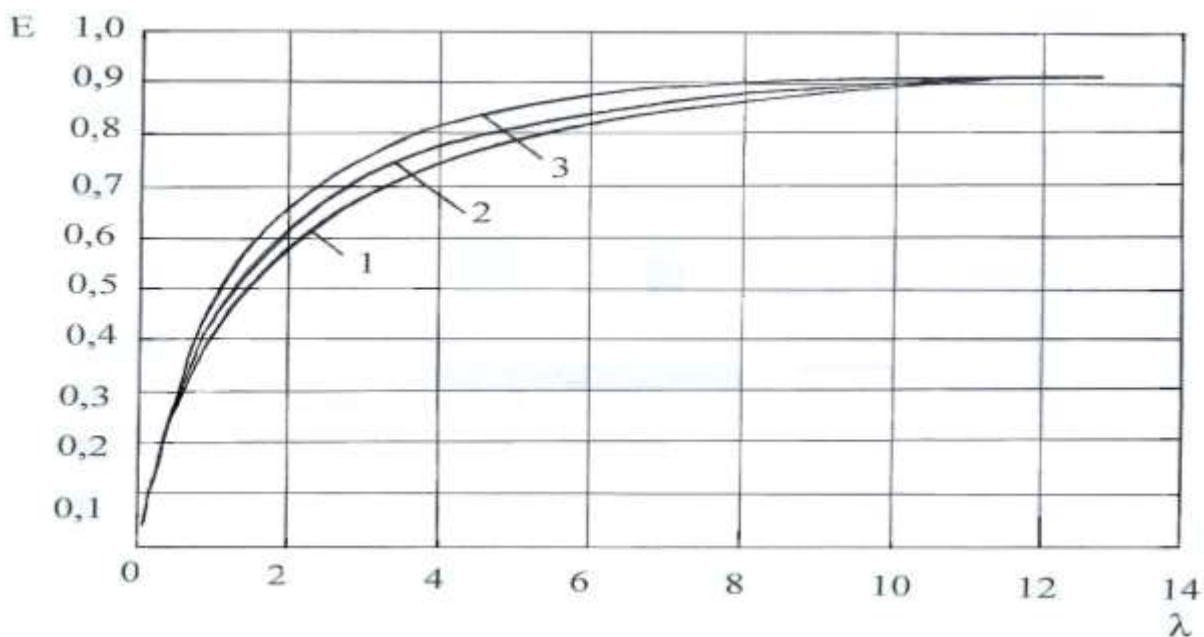
Для оценки работы абсорбционных аппаратов используется аналогичная методика. Степень охлаждения воды в градирнях ( $E_{ж}$ ) аналогична коэффициенту насыщения жидкости абсорбируемым газовым компонентом ( $\psi$ ), а степень использования воздуха в градирнях ( $E_r$ ) аналогична коэффициенту извлечения компонента из газовой смеси ( $\phi$ ). Характеристическое число « $\lambda$ », используемое для описания испарительного охлаждения воды, аналогично абсорбционному фактору « $A$ », с помощью которого описывается процесс абсорбции. Следует отметить, что эффективность работы градирен и абсорберов может определяться через кинетические характеристики процессов, к

которым относят числа единиц переноса ( $N$ ). Это число представляет собой отношение изменения рассматриваемого показателя движущей силы процесса в одном из потоков аппарата к средней движущей силе.

На рисунке 3 представлены известные [2] результаты расчётов абсорберов в виде графических зависимостей коэффициентов извлечения от абсорбционного фактора при постоянном числе переноса в газовой фазе равном единице ( $N = 1$ ). Предельные значения эффективности абсорбционных процессов существенно зависят от схемы движения потоков только в рабочих диапазонах значений абсорбционного фактора от 0,2 до 6.



**Рисунок 1** – Экспериментальные зависимости эффективности охлаждения воды от характеристического числа для градирни с регулярной насадкой типа ГРН (противоточная модель движения потоков) и для градирни с подвижной насадкой типа ГПН (модель полного перемешивания жидкости).  
1 - ГПН; 2 - ГРН.



**Рисунок 2** – Экспериментальные зависимости эффективности охлаждения воды от характеристического числа  $L$  для градирни с подвижной насадкой типа ГПН (модель полного перемешивания жидкости).

Температура воды на входе: 1 – 35 °C; 2 – 25 °C; 3 – 17 °C.

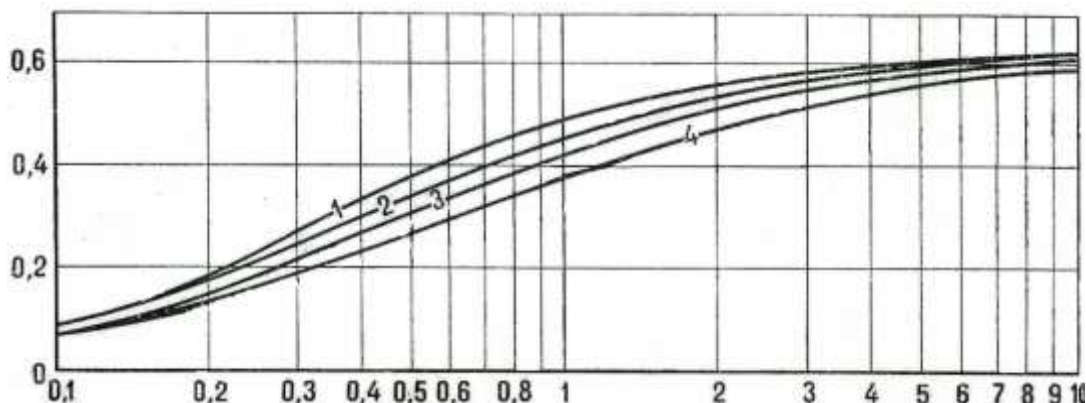
При значениях « $A$ » меньше 0,1 и больше 10 конструкция аппарата практически не оказывает влияния на эффективность проведения процессов.

Видно хорошее соответствие между рассмотрен-

ними вище експериментальними даними по ефективності роботи вентиляторних градирен и

результатами расчётов процессов в абсорберах разных конструкций.

$\varphi$



A

**Рисунок 3** – Расчётные зависимости [2] по эффективности абсорбции ( $\varphi$ ) жидкостью одного из компонентов газовой смеси от абсорбционного фактора (A) при числе переноса по газу равном единице ( $N_{ог} = 1$ ):

1 – противоток; 2 – перекрёстный ток; 3 – проток; 4 – полное перемешивание жидкости.

### III. Выводы

1. Экспериментально подтверждено, что при значениях чисел  $\lambda < 0,1$  и  $\lambda > 10$  влияние схемы контактирования потоков практического влияния на работу градирен не оказывает.

2. Экспериментально определено предельное число эффективности охлаждения воды равное 0,92, к которому стремиться процесс в промышленных градирнях разных конструкций при относительно больших расходах воздуха. По нашему предположению это обусловлено теплообменом градирен с окружающей средой.

3. Экспериментально численно определено существенное влияние изменения вязкости воды

на изменение эффективности охлаждения воды в градирне при неизменных значениях характеристического числа, что ранее не было известно.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кологривов М.М.** Гидродинамика и теплообмен в аппаратах с подвижной насадкой при испарительном охлаждении воды [Текст]: дис. канд. техн. наук : 05.04.03 защищ. 28.03.88 : утв. 12.10.88 / М.М. Кологривов. – Одесса, 1988. – 222 с.
2. **Рамм В.М.** Абсорбция газов [Текст] / В.М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 655 с.

*M.M. Kologrivov, V.P. Buzovskiy*

The V.S. Martynovsky institute of refrigeration, cryogenic technologies, and ecological power energy, 65082, Odesa, Dvoryanska 1/3 str.

### INDUSTRIAL CONTACT APPARATUSES OPERATION EFFICIENCY

*The experimental research results of water cooling efficiency in various constructions ventilator cooling towers at relative expenditures of water and air in a wide range is presented in the article. The obtained data were compared with similar characteristics of the absorbers.*

**Keywords:** Cooling tower – Absorber – Efficiency of the process – Limit loads – Water viscosity

### REFERENCES

1. **Kologrivov M.M.** Hidrodinamika i teploobmassobmen v apparatakh s podvizhnoy nasadkoy pri isparitel'nom okhlazhdenii vody [Текст]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.04.03 zashchishch.

28.03.88: utv. 12.10.88 / М.М. Kologrivov. – Odessa, 1988. – 222 s.

2. **Ramm V.M.** Absorbtsiya gazov [Текст] / V.M. Ramm. – М.: Khimiya, 1976. – 655 s.

Отримана в редакції 14.11.2013, прийнята до друку 04.03.2014