

Канальная модель аэродинамики градирни

Александр Пушнов

Кафедра ЮНЕСКО
„Техника экологически
чистых производств“,
Московский государственный
университет инженерной экологии,
ул. Старая Басманная, 21/4,
105066, Москва, Россия
E-mail: pushnovas@gmail.com

На основе анализа особенностей реальной аэродинамической обстановки в вентиляторных и башенных градирнях предложена поликанальная N-зонная модель аэродинамики градирни. Рассмотрено влияние различных параметров процесса испарительного охлаждения на эффективность процесса. Показана возможность программирования профиля скорости путем изменения геометрических характеристик насадки. Отмечена важность учета влияния реальных особенностей аэродинамической обстановки в градирне на величину уноса капельной влаги из градирни. На базе предложенной поликанальной модели обоснована новая концепция выбора оптимальной конструкции каплеотбойных устройств и их расположения в поперечном сечении градирни, что позволяет улучшить ее экологические характеристики.

Ключевые слова: башенная градирня с естественной тягой, вентиляторная градирня, аэродинамика, поле скоростей, модель, экология, насадка, глубина охлаждения, унос капельной жидкости

ВВЕДЕНИЕ

Градирни являются важным элементом технологии практически любого современного крупного предприятия химического, энергетического и пищевого профиля. Находящиеся в эксплуатации, а также сооружаемые градирни имеют технические и экологические характеристики, которые не всегда соответствуют жестким требованиям Европейского Союза. В определенной мере это обусловлено игнорированием в проектах башенных и секционных вентиляторных градирен важных особенностей аэродинамической обстановки в них.

Цель настоящей статьи – обосновать канальную модель аэродинамики градирни на основе анализа особенностей реальной аэродинамической обстановки в промышленных вентиляторных и башенных градирнях.

Общий вид башенной противоточной градирни с естественной тягой диаметром \varnothing 64,4 м показан на рис. 1. На рис. 2 представлен общий вид секционной вентиляторной градирни с вентилятором диаметром \varnothing 4,5 м.

Эффективность процесса теплообмена в градирне обычно оценивают с помощью критерия Меркеля:

$$Me = (\beta_{xv} \cdot H) / q_L, \quad (1)$$

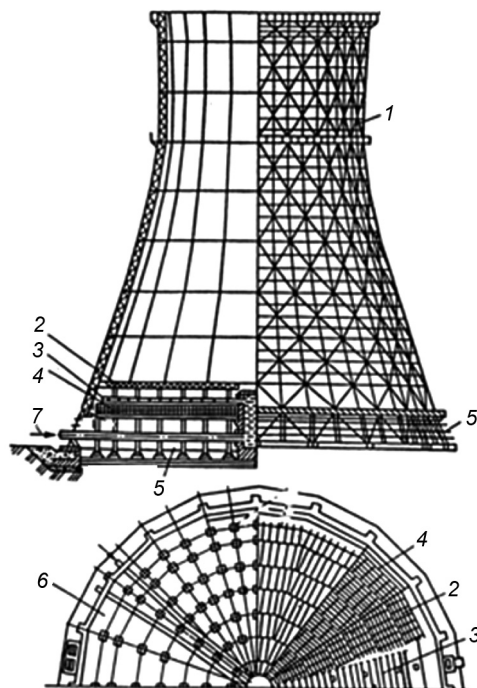


Рис. 1. Башенная противоточная градирня по проекту БГ-3200-73 с естественной тягой диаметром \varnothing 64,4 м. 1 – вытяжная башня; 2 – каплеотбойное устройство; 3 – водораспределительная система; 4 – насадка; 5 – воздухоподъемные окна; 6 – водосборный бассейн; 7 – подача подогретой воды в зимнюю антиобледенительную систему

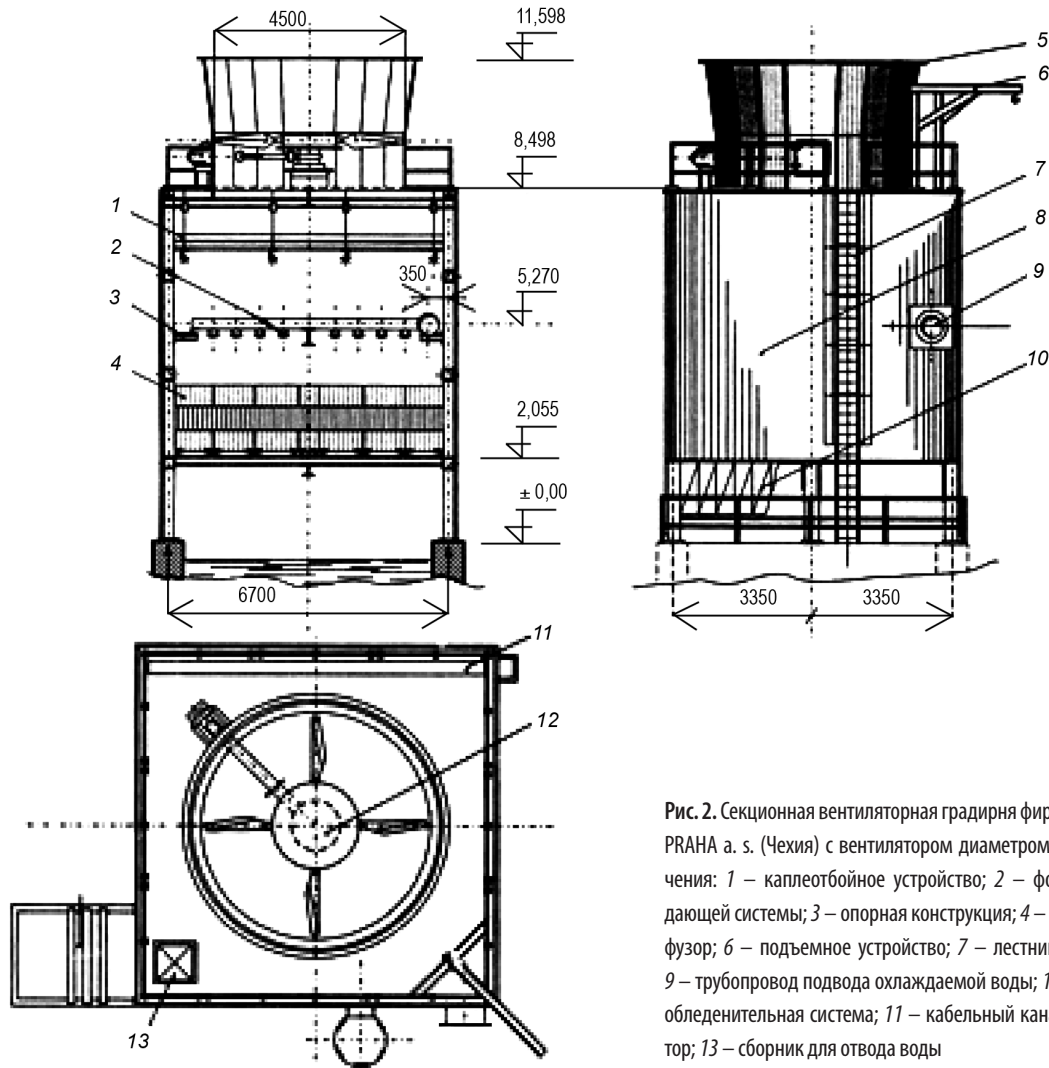


Рис. 2. Секционная вентиляторная градирня фирмы CHLADICIVĚŽE PRAHA a. s. (Чехия) с вентилятором диаметром $\varnothing 4,5$ м. Обозначения: 1 – каплеотбойное устройство; 2 – форсунки водораздающей системы; 3 – опорная конструкция; 4 – насадка; 5 – диффузор; 6 – подъемное устройство; 7 – лестница; 8 – обшивка; 9 – трубопровод подвода охлаждаемой воды; 10 – зимняя антиобледенительная система; 11 – кабельный канал; 12 – вентилятор; 13 – сборник для отвода воды

где β_{xv} – объемный коэффициент массоотдачи, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; H – высота слоя насадки в градирне, м; q_L – удельный массовый расход жидкости, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

При этом зависимость объемного коэффициента массоотдачи β_{xv} от соотношения масс взаимодействующих в объеме градирни потоков воды и воздуха и конструктивных параметров насадки градирни определяется по уравнению:

$$Me = A \cdot H \cdot \lambda^m, \quad (2)$$

где A – коэффициент; λ – относительный расход воздуха; m – показатель степени.

Уравнение (2) обычно используется при построении графической зависимости $Me = f(\lambda)$ в логарифмических координатах. Линейная зависимость

$$\lg (Me / H) = \lg A + m \cdot \lg \lambda \quad (3)$$

показывает, что с увеличением относительного расхода воздуха (λ) величина числа Меркеля (Me) также увеличивается.

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ГРАДИРЕН НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Экологическое воздействие рассматривалось в докладе [1], а также в работах [2, 3]. Оно определяется следующими факторами:

- унос капельной влаги, содержащей следы отдельных химических компонентов, использованных при химической подготовке оборотной воды систем оборотного водоснабжения;
- шумовое воздействие;
- паровой факел, образующийся на выходе нагретого атмосферного воздуха из градирни.

В настоящей статье на основе анализа особенностей аэродинамической обстановки в башенных и вентиляторных градирнях предлагается поликанальная N-зонная модель аэродинамики градирни. Даются обоснованные рекомендации по практическому использованию предлагаемой модели для прогнозирования аэродинамической обстановки при выполнении проектов реконструкции действующих и вновь сооружаемых градирен энергетических и других промышленных объектов.

ОСОБЕННОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В ГРАДИРНЕ

Применение математических и физических моделей для практического решения инженерных задач защиты окружающей среды получает все большее распространение [1, 2]. Применительно к таким сложным объектам, как градирни, моделирование их аэродинамики является сложной задачей, базирующейся на необходимости статистического обобщения масштабных и весьма трудоемких измерений полей скоростей на действующих объектах.

Распределение радиальной и аксиальной составляющих скорости воздушного потока по радиусу и высоте башенной градирни по результатам работы [3] приведено на рис. 3. Видно, что даже в условиях осесимметричного течения, характерного для башенной градирни, заметны существенные неравномерности поля скоростей. Ниже будет показано, что секционным, а также одиночным вентиляторным градирням свойственна большая неравномерность радиального распределения скорости воздушного потока по сравнению с осесимметричными башенными градирнями.

Качественная картина распределения поля скоростей воздушного потока в насадочной части секционной вентиляторной градирни показана на рис. 4. На этом рисунке на основе данных работ [4–7] и идей И. Идельчика показана принципиальная возможность управления полем скоростей в градирне за счет использования насадки с различным „живым“ сечением f (рис. 4, б). В реально существующих секционных градирнях значительная часть потока сухого атмосферного воздуха из входных окон сразу поступает в периферийную часть насадки вблизи стенок градирни (рис. 4, в). Эта зона является своеобразным „буфером“, препятствующим равномерному поступлению „свежего“ (сухого) атмосферного воздуха в основную центральную часть градирни, что негативно сказывается на величине глубины охлаждения оборотной воды в градирне.

Удельный расход воздушного потока в периферийной части реальной градирни превышает таковой в центральной ее части. В последнюю атмосферный воздух поступает транзитом через „дождь“ на выходе охлаждаемой воды из слоя периферийной части насадки. Влажность этого транзитного атмосферного воздуха,

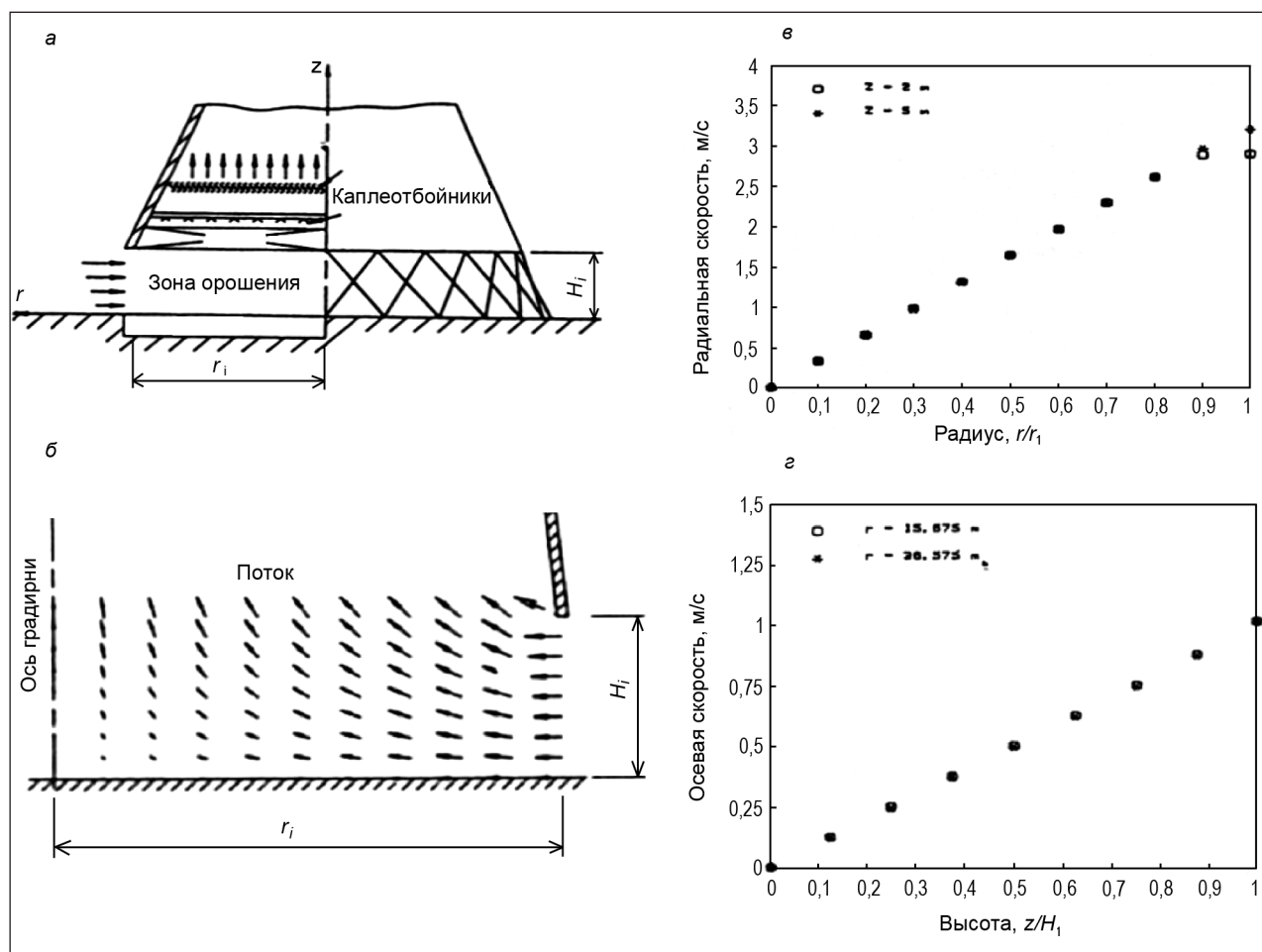


Рис. 3. Башенная градирня с естественной тягой. а – схема башенной градирни; б – распределение воздушного потока на входе в нижней части градирни; в – радиальная скорость в двух горизонтальных сечениях зоны орошения; г – осевая скорость в двух вертикальных сечениях зоны орошения

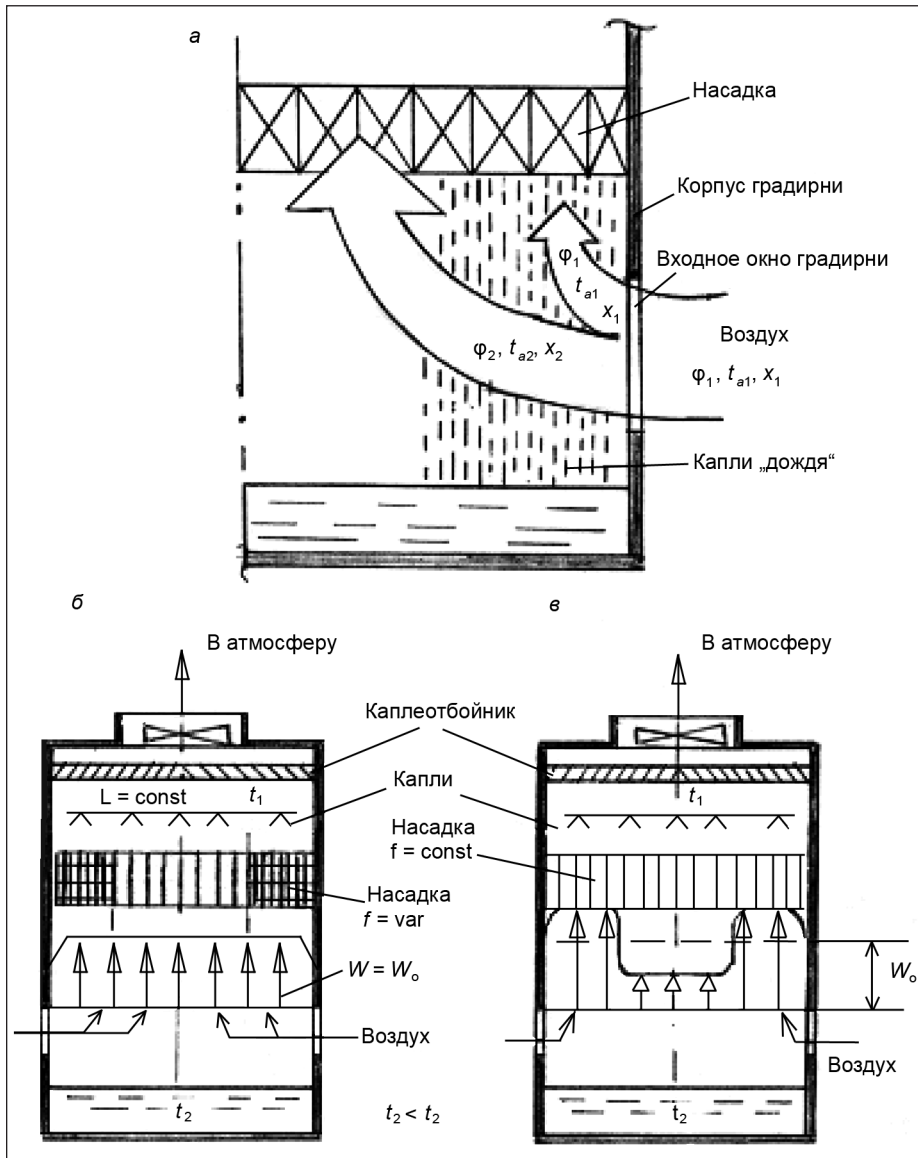


Рис. 4. Схема распределения поля скоростей воздушного потока в насадочной части секционной вентиляционной градирни. а – схема потоков воздуха в нижней части градирни; б – равномерное поле скоростей, теоретически возможное за счет использования насадки с различным живым сечением в соответствии с концепцией, предложенной в [4–7]; в – реальное поле скоростей в градирне с постоянным живым сечением в насадке

равно как и влагосодержание, при этом увеличиваются (рис. 4, а). Именно различие величин относительной влажности сухого атмосферного (φ_1) и увлажненного в пристенной области градирни воздуха (φ_2), а также их влагосодержания (x_1 и x_2) и их температур (t_{a1} и t_{a2}) соответственно снижает потенциально возможную глубину охлаждения оборотной воды. При этом имеют место следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_2 &> \varphi_1 \\ x_2 &> x_1 \\ t_{a2} &> t_{a1} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Как изменяется состояние воздуха в градирне, хорошо видно на примере реального промышленного объекта, так называемой гибридной градирни Альтвах / Дейцизау (Германия). По данным Пономаренко и Арефьева [10] атмосферный воздух на входе в такую градирню имеет следующие параметры:

- температура атмосферного воздуха $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура воздуха по влажному термометру $\tau = 7,5 \text{ }^\circ\text{C}$;
- относительная влажность $\varphi_1 = 70,8 \text{ \%}$;
- влагосодержание $x_1 = 5,38 \text{ г/кг}$.

При работе в чисто „мокрое“ режиме атмосферный воздух в градирне нагревается до $t = 28,8 \text{ }^\circ\text{C}$ с одновременным увеличением влажности до значения $x_2 = 26 \text{ г/кг}$. При этом состояние воздуха характеризуется более чем 100-процентной влажностью. Именно это явление приводит к образованию парового факела на выходе из градирни.

Влияние поднасадочного пространства градирни

Вклад „дождя“ поднасадочного пространства в величину высоты зоны охлаждения оборотной воды ($t_2 - \tau$) на примере башенной противоточной испарительной градирни производительностью по воде 100 000 м³/ч детально исследовали Сухов и Шишов в [11], где сопоставлялись

Таблица 1. Результаты тепловых расчетов башенной градирни по данным [11] с различными насадками

| Тип конструкции насадки в градирне | Высота насадки H , м | Высота зоны охлаждения $(t_2 - t)$, °С | Температурный перепад, °С | | Относительный вклад* частей градирни в величину $(t_2 - t)$, % | |
|------------------------------------|------------------------|---|---------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------|
| | | | насадка Δt_p | поднасадочное пространство Δt | насадка | поднасадочное пространство |
| Капельный „ПР50“ | 0,5 | 13,2 | 6,9 | 1,7 | 2,3 | 12,9 |
| | 1,0 | 12,0 | 7,7 | 1,4 | 64,3 | 11,6 |
| | 1,35 | 11,4 | 8,0 | 1,3 | 70,2 | 11,4 |
| Капельный „Balcke-Durr“ | 1,35 | 11,5 | 7,6 | 1,4 | 66,1 | 12,2 |
| Пленочный „ТГ44“ | 1,4 | 12,1 | 7,3 | 1,5 | 60,3 | 12,4 |
| | 2,15 | 11,2 | 7,8 | 1,3 | 69,6 | 11,6 |

* Рассчитано нами по данным работы [11]. Здесь t_2 – температура воды на выходе из градирни; t – среднесуточная температура атмосферного воздуха по влажному термометру.

различные конструкции оросительных устройств, прошедшие тестовые испытания на опытном стенде ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (Санкт-Петербург).

Некоторые результаты этой работы представлены в табл. 1.

Расчетные параметры башенной градирни диаметром основания 125 м и высотой 150 м в [11] составляли:

плотность орошения $q_L = 10,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 / \text{ч})$;

температурный перепад $\Delta t = 10,0 \text{ °С}$;

температура входящего воздуха $\theta_1 = 19,3 \text{ °С}$;

относительная влажность входящего воздуха $\varphi_1 = 63 \%$;

скорость воздуха $W_0 = 1,39\text{--}1,57 \text{ м/с}$.

Наши расчеты, основанные на результатах [11, 6], показали, что температурный перепад в поднасадочном пространстве градирни вносит довольно существенный вклад в величину высоты зоны охлаждения как капельных, так и пленочных типов насадки. Из табл. 1 видно, что абсолютная величина теплосъема в зоне капельного потока поднасадочного пространства градирни находится в пределах от 1,3 до 1,7 °С. Относительная величина вклада поднасадочного пространства в общую величину теплосъема в градирнях с капельным и пленочным типами насадки практически совпадает. Согласно нашим расчетам, этот относительный вклад для градирен с капельными насадками составляет от 11,6 до 12,9 % и для градирен пленочного типа – от 11,6 до 12,4 %.

Изменение профиля скорости по высоте градирни

С точки зрения экологии особый интерес представляет характер трансформации профиля скорости воздушного потока в градирне по ее высоте. Интересные результаты представлены в теоретической работе Зюнига-Гонзалеза (I. Zúñiga-González) [8], в которой на основе модели турбулентной диффузии были получены расчетные данные по распределению полей скоростей в пространстве башенной градирни. Они представлены на рис. 5, на котором хорошо видно, что существенная часть поперечного сечения градирни на отметке расположения водоуловительных решеток приходится на область скоростей воздушного потока $w < 1,0 \text{ м/с}$. Этот весьма существенный

факт будет использован нами далее в предлагаемой новой концепции выбора и расположения каплеотбойных устройств градирни.

Сравнительный анализ особенностей аэродинамической обстановки в одиночной вентиляторной градирне и в башенной градирне с естественной тягой показывает, что каждый из рассматриваемых типов градирни имеет характерные особенности на различных отметках по высоте.

В башенной градирне профиль скорости на отметке расположения насадки и каплеотбойного устройства в целом остается относительно более равномерным на значительной части своего поперечного сечения, за исключением небольшой области возле боковых входных окон, где локальные удельные расходы воздушного потока имеют более высокие значения.

В одиночной вентиляторной градирне на отметке расположения насадки наибольший удельный расход воздушного потока также отмечается возле боковых входных окон. В вентиляторных градирнях, в отличие от башенных, профиль скорости отличается большей неравномерностью и более высокими абсолютными

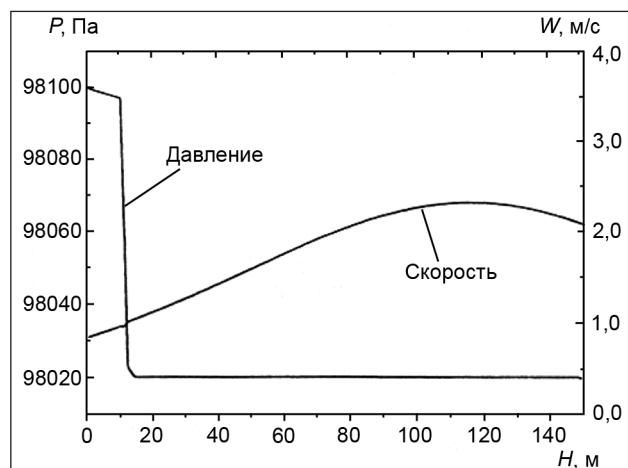


Рис. 5. Изменение давления и скорости воздушного потока по высоте башенной градирни по результатам расчетов Зюнига-Гонзалеза (I. Zúñiga-González) [8]. P – давление, Па; W – скорость, м/с; H – высота, м

значениями локальных удельных расходов во всем поперечном сечении градирни. Другим важным отличием вентиляторных градирен с верхним расположением вентиляторов является значительная трансформация профиля скорости по высоте градирни, начиная от ее входного сечения. При трансформации профиля скорости по высоте вентиляторной градирни максимум локальной скорости смещается к центральной оси градирни, что обусловлено тягой вентилятора.

Влияние скорости воздушного потока на унос капельной влаги из градирни

В работе [9] были проведены интересные опыты по прямому измерению профиля распределения локального уноса капельной жидкости в поперечном сечении каплеотбойных устройств различного типа (рис. 6) при различных скоростях воздушного потока. Проведенный нами анализ, результаты которого представлены на рис. 7, позволил выявить определенную закономерность. Во всех случаях у каплеотбойных устройств одинакового жалюзийного типа (рис. 6, А, Б и В) экстремальные значения величины уноса наблюдались в одной и той же точке ($y = 0,3$ м) поперечного сечения опытной установки. Локальное возрастание величины уноса в обсуждаемой работе [9], по нашему мнению, указывает на то, что в этом месте была явная постоянная неоднородность воздушного потока. Характерно, что отмеченная закономерность с увеличением скорости потока усиливается.

В целом можно констатировать, что аэродинамическая обстановка в градирне существенно влияет на характеристики каплеотбойных устройств. Наряду с этим значительно и влияние конструктивных особенностей последних.

Выпускаемые различными фирмами каплеотбойные устройства различаются как по конструкции, так и по характеристикам.

В табл. 2 представлены некоторые технические характеристики каплеотбойных устройств по данным фирм SPIG (Италия) и CHLADICI VĚŽE PRAHA a. s. (Чехия). Величина капельного уноса жидкости (коэффициент К) здесь указана в % от общего расхода жидкости в градирне.

Осуществить анализ рекламных данных таблицы довольно сложно, поскольку трудно судить о действительном значении величины капельного уноса в рабочем диапазоне скоростей воздушного потока, который, например, в

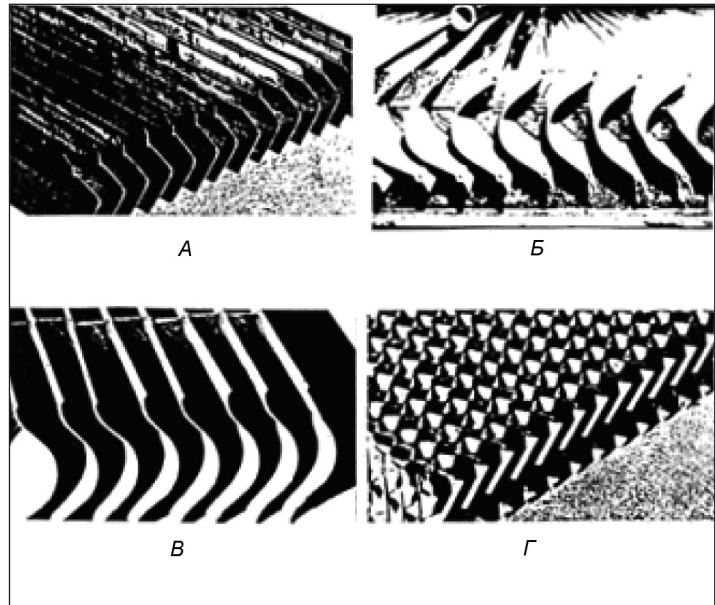


Рис. 6. Типы каплеотбойных устройств, испытанных в работе [9]

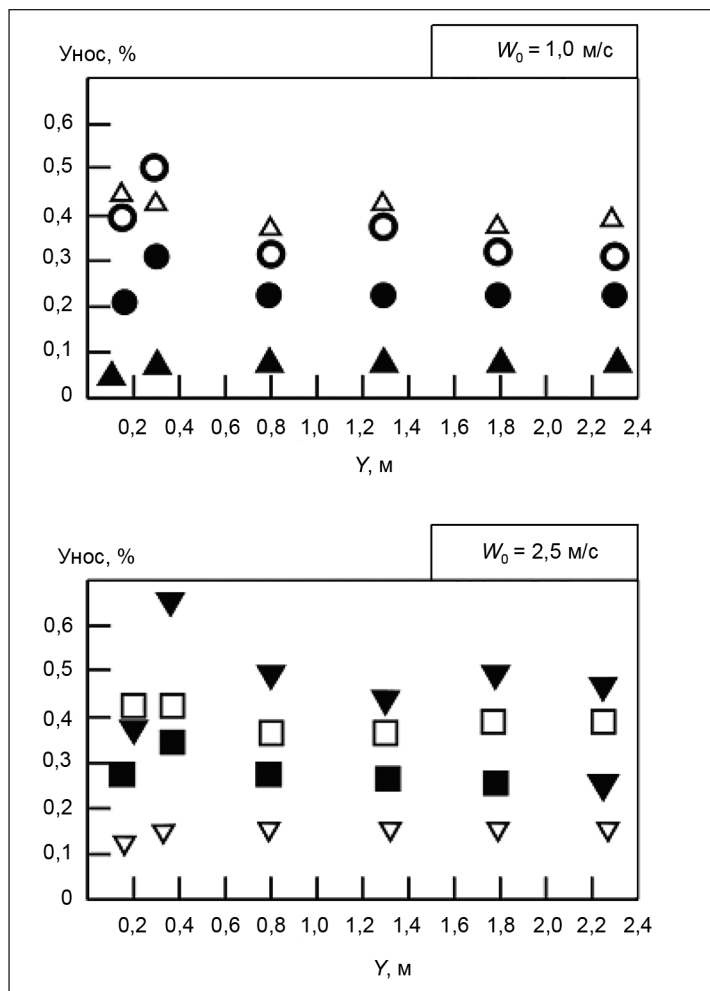


Рис. 7. Результаты опытов [9] по измерению локального уноса капельной влаги в различных каплеотбойных устройствах (рис. 6, А, Б, В и Г) при различных скоростях воздушного потока ($W_0 = 1,0$ м/с и $W_0 = 2,5$ м/с)

Таблица 2. Сравнительные характеристики каплеотбойных устройств по данным [14, 15]

| Фирма-производитель | SPIG (Италия) | | | | CHLADICI VĚŽE PRANA a. s. (Чехия) |
|---|---------------|----------|-----------------|---------------|--------------------------------------|
| | WAVE | SHELL | CELLULAR CF, XF | H-MOON | АОК 130 |
| Тип | WAVE | SHELL | CELLULAR CF, XF | H-MOON | АОК 130 |
| Материал | ПВХ / ПП | ПВХ / ПП | ПВХ | ПВХ / ПП | ПВХ / ПЭ |
| Максимальная рабочая температура, °С | 60 | 60 | 60 | 60 | 65 |
| Максимальная скорость воздушного потока, м/с | 3,5 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 3,5 |
| Высота профиля, мм | 146 | 167 | 146 | 175 | 130 |
| Коэффициент капельного уноса – К, % | 0,05 | 0,002 | 0,001 | 0,002 / 0,001 | – |

капельных градирнях составляет 1,6–2,1 м/с [10]. Между тем зависимость величины капельного уноса от скорости W_0 , как показано в работе [16], носит экстремальный характер.

Эффективность каплеотбойного действия оценивали процентным соотношением вида [17]:

$$\eta = \frac{(q_1 - q_2)}{q_1} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где q_1 и q_2 – вынос капельной влаги из градирни, соответственно без каплеотбойного устройства и с ним.

К сожалению, пересчитать приводимые зарубежными фирмами характеристики по капельному уносу в сравнимые с принятым в России критерием эффективности каплеотбойного действия η не всегда представляется возможным из-за отсутствия в рекламных материалах необходимой информации.

ПОЛИКАНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИКИ ГРАДИРЕН

Ниже приводятся результаты обобщения опытных данных по полям скоростей в градирнях башенного типа с естественной тягой и в одиночной вентиляторной градирне. Поскольку экологические и сырьевые аспекты работы градирен являются весьма существенными для их оптимальной эксплуатации, здесь рассматривается именно та часть объема внутреннего пространства градирен, в которой расположены каплеотбойные устройства. Аналогичный подход может быть использован и при анализе особенностей течения воздушного потока в насадочной части градирни.

Основная идея предлагаемой поликанальной модели заключается в обоснованном выделении на статистически представительных профилях скорости воздушного потока в одной из наиболее важных технологических областей градирни (место расположения каплеотбойного устройства) нескольких характерных зон с близкими значениями локальных скоростей – W_i . Локальные скорости в пределах каждой из выделенных зон усредняются и в последующем используются среднеинтегральные величины, полученные методом графического интегрирования.

Модель башенной градирни с естественной тягой

Статистической базой для создания математической модели башенной градирни послужили опытные данные ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [18], полученные в башенной градирне с естественной тягой площадью орошения 1 520 м² на отметке расположения каплеотбойных устройств (см. схему башенной градирни на рис. 1). Статистически представительный профиль скорости на указанной отметке градирни, построенный нами по методике, изложенной в работе [19], представлен на рис. 8. Как видно, средняя скорость в поперечном сечении башенной градирни составляет $\bar{W}_i = 0,6$ м/с.

На рис. 9 показана процедура определения характерных зон и графического интегрирования скоростей по отдельным зонам. В данном случае таких зон всего четыре: *A* – центр градирни; *B* – основная ее часть; *C* – промежуточная ее часть; *D* – периферия градирни. Соответствующие линейные уравнения средних скоростей потока по названным зонам имеют вид $W = X$, где значения коэффициента X равны: для зоны *A* – 0,7; для зоны *B* – 0,54; для зоны *C* – 0,65; для зоны *D* – 0,43.

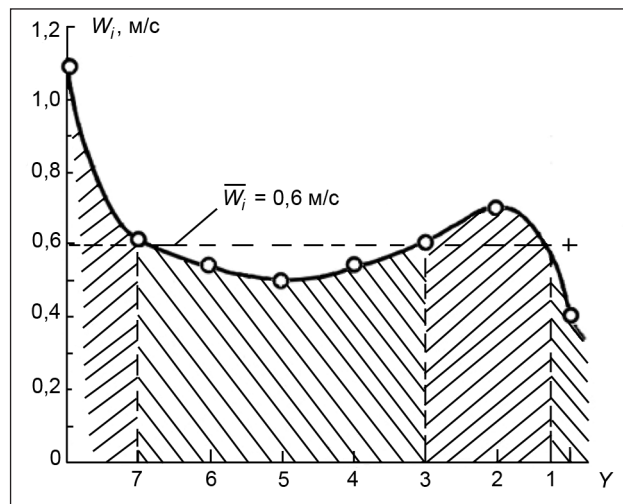


Рис. 8. Профиль локальных скоростей W_i на выходе воздушного потока из водораздающей системы башенной градирни с естественной тягой площадью орошения 1 520 м² на основе опытов [18]. Y – безразмерное расстояние от стенки, кратное размерам секции каплеотбойного устройства; значение $Y = 0$ соответствует стенке градирни

Модель одиночной вентиляторной градирни

Основой для модели одиночной вентиляторной градирни послужили экспериментальные данные работы [19] по обследованию градирни типа СК-400 площадью орошения 400 м^2 на отметке $+7,83 \text{ м}$ (местоположение каплеотбойного устройства). Статистически представительный профиль локальных скоростей приведен на рис. 10. Отметим, что средняя скорость в поперечном сечении вентиляторной градирни выше, чем в башенной, и составляет $\bar{W}_i = 1,0 \text{ м/с}$.

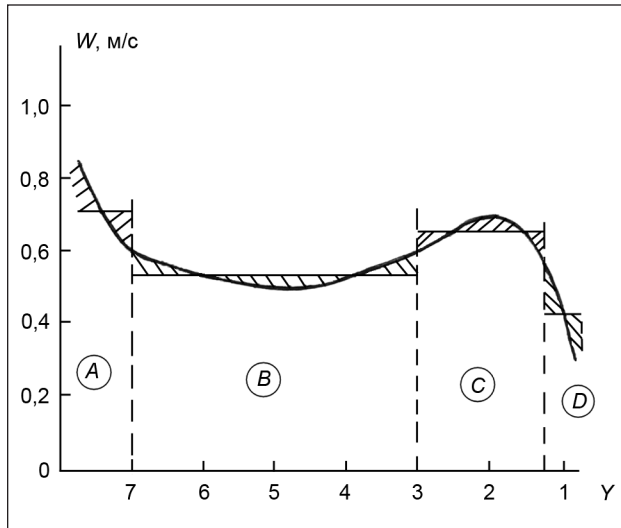


Рис. 9. Поликанальная модель аэродинамики башенной градирни с естественной тягой (площадь орошения 1520 м^2) на отметке расположения каплеотбойных устройств. Разбивка по зонам

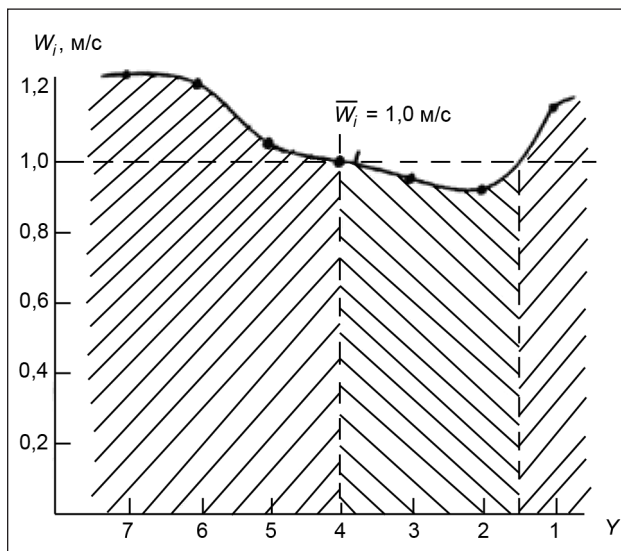


Рис. 10. Профиль локальных скоростей W_i воздушного потока в вентиляторной градирне СК-400 на отметке $+7,83 \text{ м}$ по данным нашей обработки результатов опытов [19]. Y – безразмерное расстояние от стенки, кратное размерам сечения каплеотбойного устройства; значение $Y = 0$ соответствует стенке градирни

На рис. 11 показана процедура графического интегрирования скоростей воздушного потока по отдельным зонам (A, B, C).

Уравнения скоростей потока по выделенным зонам градирни также имеют линейный характер вида $W = X$, где значения коэффициента X равны: для зоны A (центральная область градирни) – $1,17$; для зоны B (средняя часть градирни) – $0,96$; для зоны C (периферия градирни) – $1,1$.

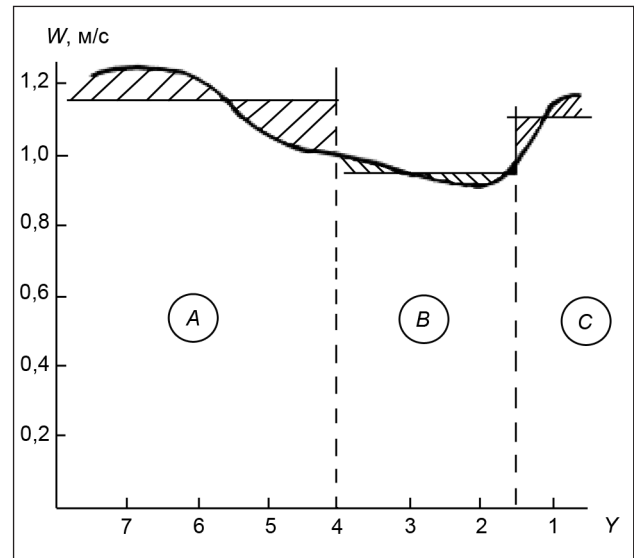


Рис. 11. Поликанальная модель аэродинамики одиночной вентиляторной градирни типа СК-400 на отметке $+7,83$ (место расположения каплеотбойных устройств)

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Обсуждая возможности практического применения изложенной поликанальной модели аэродинамики градирни остановимся на двух направлениях, которые представляются наиболее важными: выравнивание поля скоростей в градирне и новая концепция выбора оптимальной конструкции каплеотбойных устройств и их расположения в поперечном сечении градирни. Последнее, как показано в [7, 13], особенно актуально в экологическом и сырьевом аспектах.

К выравниванию поля скоростей в блоках регулярной насадки

Для широко применяемых в градирнях регулярных насадок пленочного типа величина коэффициента A, характеризующего эффективность конструкции насадки, пропорциональна удельной поверхности насадки S. Соответствующая зависимость имеет вид линейной функции:

$$A = B + C \cdot S. \quad (6)$$

В работе [10] показано, что $B = 0,215$; $C = 0,0112$. Такой же линейный характер носит зависимость коэффициента гидравлического сопротивления регулярной насадки – ζ от „насыщенности“ твердой фазы слоя насадки – ψ . Пропорциональность коэффициентов ζ и ψ выражается зависимостью

$$\zeta = E + K \cdot \psi, \quad (7)$$

где $\psi, \text{ м}^3/\text{м}^3$ – доля объема элемента слоя насадки, занятая твердой фазой. Очевидно, коэффициент ψ есть величина, пропорциональная „живому сечению“ f и обратная значению порозности – $\varepsilon, \text{ м}^3/\text{м}^3$, т. е. доле свободного объема слоя насадки:

$$\varepsilon = (1 - \psi). \quad (8)$$

По данным [10] коэффициенты E и K в уравнении (7) имеют следующие значения: $E = 0,44$, $K = 15,94$.

Задаваясь величиной коэффициента ψ , можно по уравнениям (6) и (7) найти величины параметров A и ζ .

Выравнивание поля скоростей в градирне, как это показано в работах [4–7], возможно посредством выравнивания „живого сечения“ f блоков используемой насадки в различных зонах градирни. Уравнение, связывающее соотношение скоростей и потери напора в двух зонах градирни с различным „живым сечением“, имеет вид [5]:

$$\frac{W_{01}}{W_{02}} = \sqrt{\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}}, \quad (9)$$

где W_{01} – средняя скорость воздушного потока в зоне 1 градирни; W_{02} – средняя скорость воздушного потока в зоне 2 градирни; ΔP_1 и ΔP_2 – величина потери напора в соответствующей зоне градирни.

Величину потери напора в соответствующей i -той зоне градирни можно определить по уравнению:

$$\Delta P_i = \zeta_i \cdot \frac{H \cdot \rho \cdot W_{0i}^2}{d_e \cdot 2}, \quad (10)$$

где i – номер зоны, ρ – плотность газа, H – высота слоя насадки, d_e – эквивалентный диаметр канала, который определяется уравнением

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{\Pi}, \quad (11)$$

где F – площадь поперечного сечения канала; Π – периметр канала.

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n S_i \cdot W_{0i} = F_{\text{гр}} \cdot W_{0\text{гр}}, \quad (12)$$

где S_i – площадь поперечного сечения i -той зоны градирни; $F_{\text{гр}}$ – площадь поперечного сечения градирни.

Совместное решение уравнений (9)–(12) позволяет прогнозировать профиль удельных расходов воздуха на входе в слой насадки.

Массивный расход воздуха в i -той зоне градирни имеет вид:

$$G_i = W_{0i} \cdot \rho \cdot S_i. \quad (13)$$

Широкая гамма выпускаемых в промышленном масштабе регулярных насадок различного типа (пленочных, капельных и др.), имеющих различные значения параметров $\zeta, s, \psi, \varepsilon$, позволяет на основании поликанальной модели и в соответствии с методикой, изложенной в работах [4–7], создавать комбинации, способствующие более равномерному распределению потока воздуха во всем поперечном сечении градирни (рис. 9, В).

К проблеме снижения потерь капельной жидкости в градирне

Как уже отмечалось, снижение уноса капельной жидкости из градирни является наиболее актуальной экологической и сырьевой задачей, возникающей при эксплуатации башенных и вентиляторных градирен. Один из возможных методов решения этой задачи – выравнивание поля скоростей в градирне на отметке расположения каплеотбойного устройства. Однако на практике в реально существующих вентиляторных промышленных градирнях, например типа СК-400, на протяжении всего пути воздушного потока от входных окон и верхней части насадки до места расположения каплеотбойного устройства и вентилятора поток претерпевает значительные трансформации. При этом максимум скорости сдвигается по высоте от стенки корпуса к центральной осевой линии градирни. Поэтому полное выравнивание поля скоростей в градирнях данного типа в месте расположения каплеотбойного устройства не представляется возможным. В то же время неоднородности воздушного потока необходимо учитывать, что и позволяет предлагаемая поликанальная модель.

Что касается башенных градирен, то, как видно из графика на рис. 9, практически вся площадь их поперечного сечения фактически работает при скоростях воздушного потока существенно более низких, чем $\overline{W}_i = 1,0$ м/с. Даже если принять за базовую скорость $\overline{W}_i = 0,6$ м/с (рис. 9), то и в этом случае видно, что основная часть градирни (зоны В и Д на рис. 9) работает в области еще более низких скоростей $\overline{W}_i < 0,6$ м/с. Между тем именно при таких низких скоростях воздушного потока эффективность каплеотбойного действия снижается и достигает по данным [16] величин $\eta \leq 90$ –94 %.

Новая концепция расположения каплеотбойных устройств в градирне

Экстремальный характер зависимости $\eta = f(W_0)$ и особенно заметное влияние скорости воздушного потока

при значениях $W_0 \leq 1,5$ м/с указывают на актуальность и важность проблемы (рис. 12).

Сопоставление приведенных на рис. 8, 10 полей скоростей в одиночной вентиляторной и башенной градирнях и характеристик основных типов каплеотбойных устройств (рис. 12) убедительно показывает, что оптимальные рабочие характеристики не могут быть достигнуты в случае применения какой-либо одной однородной укладки однотипных каплеотбойных устройств по всей площади поперечного сечения градирни, как это делается в настоящее время.

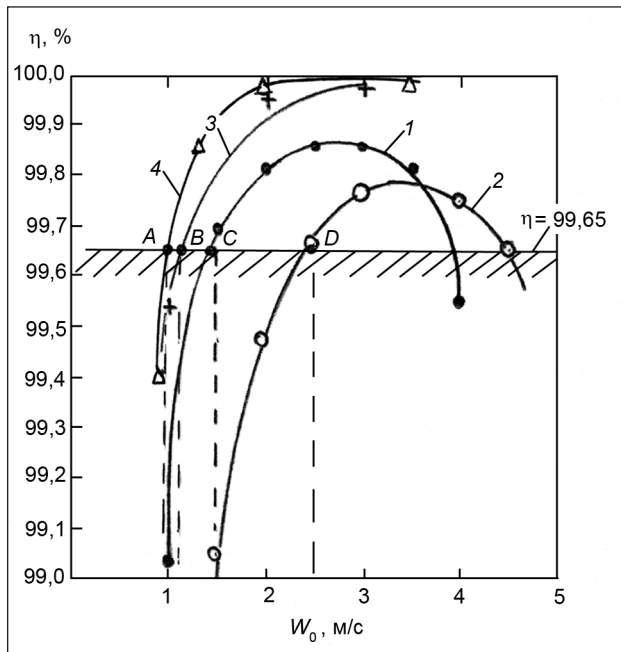


Рис. 12. Зависимость эффективности каплеотбойного действия от скорости воздушного потока. 1 – каплеотбойник из алюминия Z-образного профиля [16]; 2 – криволинейный каплеотбойник [21]; 3 – каплеотбойник в виде 2-х слоев горизонтальных цилиндров из текстильных объемных структур [21]; 4 – каплеотбойник из наклонных гофротруб типа КУ-75 „ТЕХВОДПОЛИМЕР“ [20]

Проблема решается с помощью поликанальной модели посредством разделения поперечного сечения градирни на соответствующие характерные зоны (рис. 9 и 11) и установкой в каждой зоне градирни специально подобранной конструкции с соответствующей характеристикой $\eta = f(W_0)$.

В соответствии с рекомендациями [10, 17] можно принять в качестве критического значения эффективности каплеотбойного действия величину $\eta = 99,65$. Используя предложенную поликанальную модель, условно разделить представленные на рис. 12 конструкции каплеотбойных устройств на две группы, границы между которыми показаны вертикальными пунктирными линиями. В каждом из показанных на рис. 12 случаев оптимальный рабочий диапазон каплеотбойников лежит справа от пунктирной линии.

ВЫВОДЫ

На основании анализа особенностей аэродинамической обстановки в градирнях башенного типа с естественной тягой, а также в одиночных вентиляторных градирнях разработана новая упрощенная поликанальная модель аэродинамики градирен указанного типа.

Предложенная модель может быть использована для решения экологической и сырьевой проблемы снижения потерь капельной влаги в градирне на основе концепции расположения нескольких типов каплеотбойных устройств с учетом реальных особенностей аэродинамической обстановки. Предложенная модель может быть использована также для решения важной задачи выравнивания поля скоростей в поперечном сечении градирни в месте расположения насадки, что позволит увеличить глубину охлаждения оборотной воды в градирне.

Поступило 10 01 2011

Принято 17 02 2011

Литература

1. Baltrėnas P., Morkūnienė J., Vaitiekūnas P. Mathematical simulation of solid particle dispersion in the air of Vilnius city. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2008. Vol. 16(1). P. 15–22.
2. Baltrėnas P., Vaitiekūnas P., Vasarevičius S., Jordaneh S. Automobilių išmetamų dujų sklaidos modeliavimas. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2008. Vol. 16(2). P. 65–75.
3. Hoffmann J. E., Kröger D. G. Analysis of heat mass and momentum transfer in the rain zone of a natural draft counterflow cooling tower. *The 7th Cooling Tower and Spraying Pond Symposium, May 29–June 2, 1990*. Leningrad, 1990. P. A 10-1–A 10-8.
4. Pushnov A., Berengarten M., Ryabushenko A. Influence of aerodynamic conditions in cooling tower on losses of water in system of defensive water supply. *The 7th International Conference "Environmental Engineering", May 22–23, 2008*. VGTU Press „Technika“, 2008. P. 290–296.
5. Пушнов А. С., Беренгартен М. Г., Рябушенко А. С. Оценка возможности увеличения эффективности работы градирен на основе совершенствования их аэродинамики. *Lietuvos taikomyjū mokslų akademijos mokslų darbai*. 2007. Nr. 5. P. 47–70.
6. Пушнов А. С., Беренгартен М. Г., Рябушенко А. С. Возможности совершенствования аэродинамики градирен. *Химическая промышленность*. 2007. № 8. С. 382–402.
7. Pushnov A., Berengarten M., Ryabushenko A. Ecological impact of cooling towers of production on the environment. Technical and technological progress in agriculture. *Proceedings of the International Conference, 20–21 September 2007, Raudondvaris*. N 12. P. 259–266.
8. Zúñiga-González I. *Modeling Heat and Mass Transfer in Cooling Towers with Natural Convection*. Summary of

- dissertation. Prague: Czech Technical University in Prague, 2005. 23 s.
9. Bellagamba B., Lotti G., Mattachini F. Drift measurements at ENEL Istria pilot cooling tower. *The Cooling Tower and Spraying Pond Symposium*. May 29–June 2, 1990, Leningrad, USSR. G 3–1–G 3–9.
 10. Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И. *Градирни промышленных и энергетических предприятий*. Справочное пособие под общей редакцией В. С. Пономаренко. Москва: Энергоатомиздат, 1998. 376 с.
 11. Сухов Е. А., Шишов В. И. Аэротермические характеристики различных конструкций оросительных устройств. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. Санкт-Петербург, 2000. Т. 236. С. 215–218.
 12. Идельчик И. Е. *Аэрогидродинамика технологических аппаратов (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов)*. Москва: Машиностроение, 1983. 351 с.
 13. Арефьев Ю. И., Беззатеева Л. П. Экологические аспекты капельного уноса воды из градирни. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2007. № 2. С. 27–28.
 14. www.spig-vostok.ru
 15. www.chv-praha.cz
 16. Пушинов А. С., Каган А. М., Беренгартен М. Г., Рябушенко А. С., Шишов В. И. Эффективные каплеотбойные устройства из полимерных и металлических материалов для тепло- и массообменных аппаратов. *Химическая техника*. 2006. № 5. С. 34–39.
 17. Сухов Е. А., Румянцева М. И. Определение эффективности работы водоуловительных устройств градирен. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. Санкт-Петербург, 1986. Т. 192. С. 43–46.
 18. Недвига Ю. С., Пилипенко К. В. Натурные исследования работы разбрызгивающих форсунок с гидровентиляторами на градирне № 5 ТЭЦ-22 АООТ „Мосэнерго“. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. Санкт-Петербург, 2000. Т. 236. С. 248–253.
 19. Гладков В. А., Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С. *Вентиляторные градирни*. Москва: Стройиздат, 1976. 210 с.
 20. www.twp.ru
 21. Витковская Р. Ф. *Разработка и исследование полимерных волокнистых катализаторов и контактных элементов для ресурсосбережения и охраны окружающей среды*. Диссертация ... доктора технических наук. СПб: СПб ГУТиД, 2005. 300 с.

Aleksandr Pušnov

AUŠINTUVO AERODINAMIKOS KANALINIS MODELIS

Santrauka

Remiantis realios situacijos ventiliatoriniuose ir bokštiniuose aušintuvuose analize pateikiamas daugiakanalės ir N-zoninės aerodinamikos modelis. Analizuojama išgarinamojo aušinimo proceso parametrų įtaka aušinimo efektyvumui. Pateikiama galimybė programuoti greičio profilį keičiant aušinimo elementų geometrines charakteristikas. Analizuojama galimybė įvertinti aerodinaminę situaciją aušintuve ir pašalinti iš aušintuvo lašelinę drėgmę. Remiantis čia pateikiamu daugiakanalium modeliu pagrindžiama nauja optimalios konstrukcijos sukūrimo koncepcija, susijusi su lašelių slopinimo įrenginiais, išdėstytais skersai aušintuvo. Tai leidžia optimizuoti ekologines aušintuvo charakteristikas.

Raktažodžiai: bokštinis natūralios traukos aušintuvas, ventiliatorinis aušintuvas, aerodinamika, modelis, ekologija, lašelių slopinimo įrenginys, aušinimo gylis, lašelinės drėgmės šalinimas

Aleksander Pushnov

CHANNEL MODEL OF COOLING TOWER AERODYNAMICS

Summary

Analysis of the aerodynamic conditions in a water-cooling tower with natural traction and a single ventilator is presented. A simple polychannel model of aerodynamics of specified types of a water-cooling tower is offered. A considerable influence of the aerodynamics of a water-cooling tower on the entrainment of dropwise fluid is shown. On the basis of the polychannel model, a new concept of arranging entrainment separator devices in a water-cooling tower in view of the influence of airflow velocity on the efficiency of entrainment separators is shown. The concept allows to refine the ecological and raw aspects of the operation of an industrial water-cooling tower. The possibility of influencing the lateral view of velocities by means of changing the geometrical performance of the packing is shown.

Key words: water-cooling tower, aerodynamics, velocity fields, models ecology, nozzle cooling depth, dropwise fluid entrainment