

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ БАШЕННЫХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ГРАДИРЕН

Доброго К.В.<sup>1</sup>, Хеммасиян Кашани М.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Башенные испарительные градирни (БИГ) являются важнейшим элементом системы охлаждения воды КЭС и АЭС. Горячая вода разбрызгивается над оросителем, обладающим большой площадью поверхности и, стекая по нему, отдает тепло в воздушный поток. При этом имеет место испарение воды и относительная влажность воздуха приближается к 100 %. Теплота испарения влаги изымается из потока воды приводя к снижению ее температуры. Далее вода в капельно- струйном виде попадает в бассейн БИГ и направляется обратно конденсатор, рис. 1. Расход охлаждающей воды в современных тепловых станциях достигает 100 тысяч тонн в час, при этом до 1,5, 2 % воды может теряться в процессе испарения.

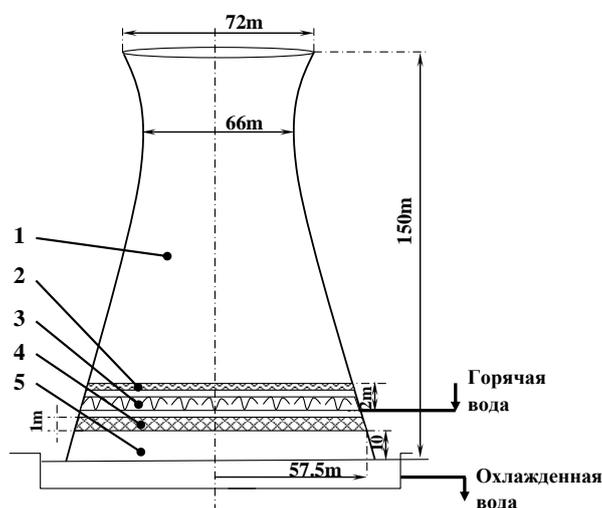


Рис. 1 - Схема башенной испарительной градирни:

1 – надоросительное пространство; 2 – каплеуловители; 3 – разбрызгиватели;  
4 – ороситель; 5 – зона дождя; 6 – бассейн

Ветер – один из важнейших факторов, влияющих на производительность БИГ. Его воздействие на работу БИГ имеет сложный характер: оно нелинейно и связано с процессами внутренней аэродинамики БИГ. Исследования показывают, что полный расход паровоздушной смеси и отбираемая от теплоносителя энергия нелинейно зависят от ветра при его малых скоростях, затем уменьшаются с ростом скорости ветра из-за «запирания» выходного сечения вихревыми образованиями, а также сквозного продувания пространства под оросителем (зоны дождя). Такое уменьшение производительности продолжается вплоть до критической скорости ветра  $U_{cr}$ , а при дальнейшем увеличении скорости ветра производительность БИГ растет.

Из известных методов управления аэродинамикой БИГ, крупномасштабное завихрение потока является относительно легко реализуемым [1] и поэтому может рассматриваться как наиболее перспективный в настоящее время.

В данном докладе исследуется влияние аэродинамических элементов БИГ, таких как ветропреградительные стенки в зоне дождя и дефлекторы в надоросительном пространстве, на производительность БИГ в условиях ветровых нагрузок. С этой целью использовано

3-мерное моделирование системы стандартными средствами CFD [2]. Верификация программных средств и моделей проведена при помощи экспериментальных данных полученных для Минской ТЭЦ-4. Полная мощность теплоотдачи вычислялась как функция скорости ветра для различных аэродинамических конфигураций БИГ. В частности варьировался угол установки дефлекторов в надоросительном пространстве. Рассматривалось комбинированное использование дефлекторов в надоросительном пространстве и ветропреградительных стенок в зоне дождя. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации конструкции действующих и вновь проектируемых БИГ.

В качестве прототипа для исследований взята БИГ тепловой электрической станции Ву-Джин в г. Шанхай, Китай (рис. 1), имеющая высоту 150 м, диаметр основания 114 м и высоту входных окон 10 м. Расчетный домен представлял из себя цилиндр с радиусом и высотой 500 м. Домен разбивался на 1,8 миллионов структурированных и неструктурированных (гибридных) ячеек. Размер сетки обеспечивал устойчивую сходимость итераций и сохранялся одним и тем же для всех расчетных вариантов. Размер ячеек плавно увеличивался от стенок градирни к периферии расчетной области.

Рассматривались три конфигурации системы: БИГ без дополнительных аэродинамических элементов (рис. 2.а), БИГ оснащенная дефлекторами в надоросительном пространстве (рис. 2.б) и БИГ оснащенная ветропреградительными стенками и дефлекторами в надоросительном пространстве одновременно (рис. 2.с). Углы установки дефлекторов составляли  $\alpha = 90^{\circ}, 70^{\circ}, 60^{\circ}, 52^{\circ}$  и  $45^{\circ}$  (измерены от горизонтальной плоскости). Высота ветропреградительных стенок равна высоте входных окон БИГ.

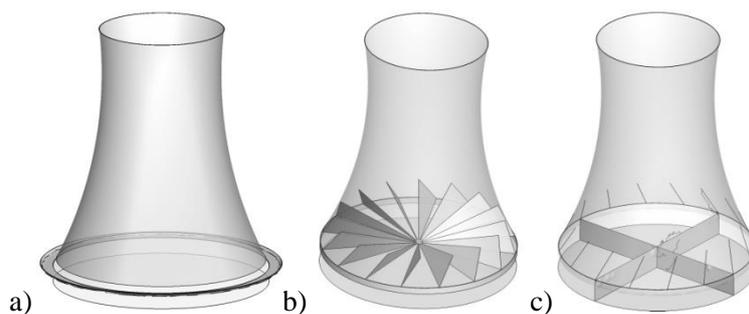


Рис. 2 - Схемы рассматриваемых БИГ. Модель с 16 дефлекторами (б) и дефлекторами и ветропреградительными стенками (с)

Ороситель, вместе с сопряженными элементами (опоры оросителя, трубопроводы, каплеуловители) моделировался при помощи встроенной во Fluent<sup>(R)</sup> модели «радиатора». Температура «радиатора» принималась постоянной. Два основных параметра, характеризующих радиатор - коэффициент газодинамического сопротивления и коэффициент теплоотдачи - оценивались на основании экспериментальных данных. Коэффициент теплоотдачи радиатора  $h_{th}$  непосредственно связан с величиной конвективного потока. Его величина была получена путем настройки расчетного значения потока паровоздушной смеси на экспериментально полученную величину этого потока [4] при заданных внешних условиях.

Зона дождя БИГ моделировалась как высокопористая среда. Пористость была определена исходя из объема капель воды при заданном его расходе и средней скорости падения и составила  $m=0,998$  для стандартных расчетных параметрах задачи. Потери импульса потока при взаимодействии с каплями рассчитывались в соответствии с моделью пористой среды FLUENT.

В соответствии с принятой моделью [2], движение газа моделировалось в квазистационарном эйлеровом приближении. Рассматривался однофазный паровоздушный поток, использовалась k-ε модель турбулентности. Задача описывалась уравнениями неразрывности, Навье-Стокса для несжимаемой вязкой жидкости и уравнением сохранения энергии.

Модель не включает расчет теплоты фазовых переходов. Поэтому для определения полного теплового баланса в системе нами принята гипотеза эквивалентности (аналогии) тепло и массопереноса в зоне оросителя и дождя.

Двумерные контуры поля температур на высоте  $h=30$  m приведены на рис. 3 для БИГ конфигураций «b» и «с». Вариация температуры по сечению  $\delta T$ , характеризующая неоднородность теплоотдачи оросителя, а также аэродинамическое смешение в надоросительном пространстве представлена на рисунке.

Расчеты показывают, что увеличение скорости ветра в общем случае приводит к росту вариации температуры в сечении. В то же время, наведенное дефлекторами вращение потока, снижает эту вариацию. В условиях штиля все конфигурации БИГ («a», «b» и «с») генерируют схожие картины распределения температуры. Возмущения температуры, генерируемые дефлекторами незначительны. Даже слабый ветер приводит к заметной потере осевой симметрии потока и поля температур и увеличению вариации температуры по сечению, рис. 3, левая колонка. Вариация температуры более значительна при использовании ветропреградительной стенки. Анализ показывает, что система с конфигурацией «с», включающая как ветропреградительные стенки, так и дефлекторы в надоросительном пространстве, более эффективна для гомогенизации температуры по сравнению с системой «b». Можно заметить, что в этом случае аэродинамическая картина потока возмущена сильнее. В результате вращение потока приводит к уменьшению вариации температуры в случае достаточно сильного вращения ( $\alpha = 60$  и  $45^\circ$ ).

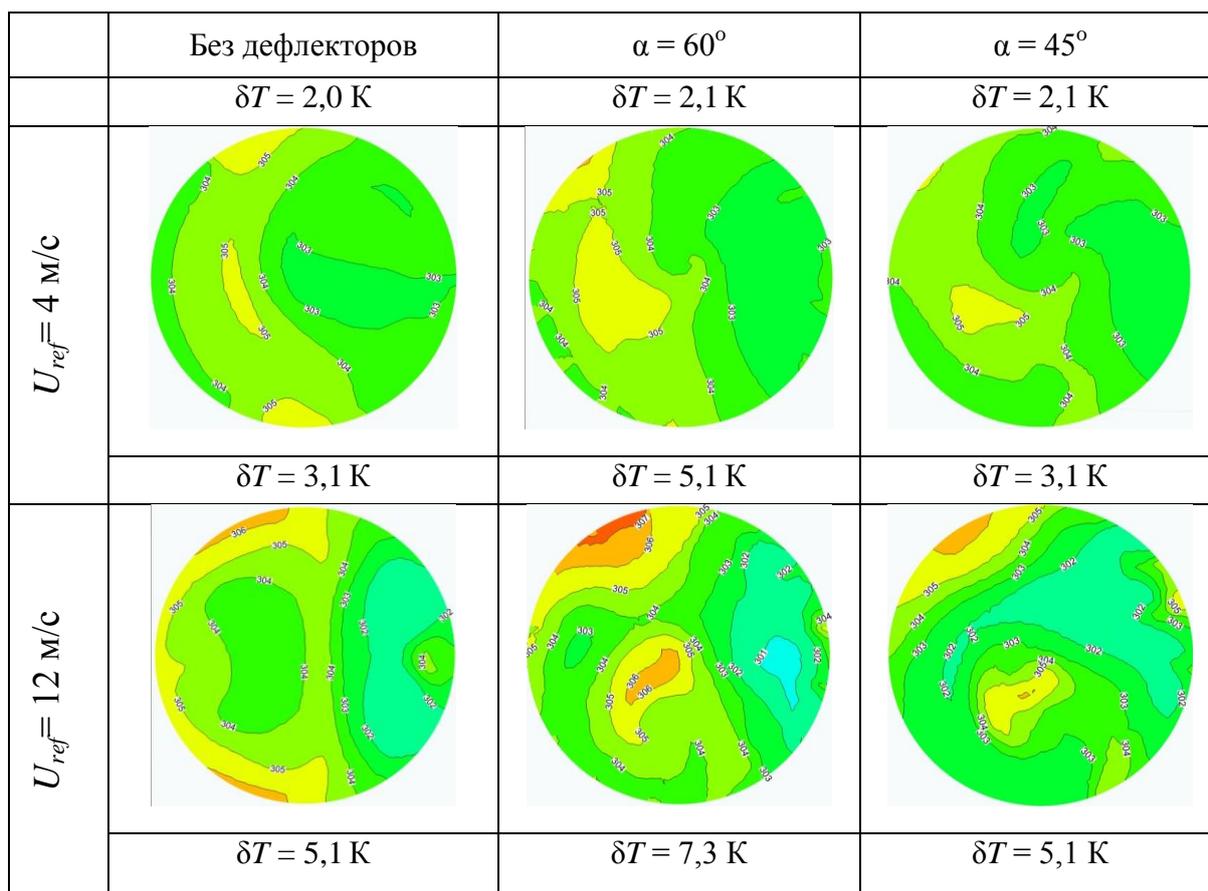


Рис. 3 - Поля температуры газовой фазы в горизонтальном сечении БИГ ( $h = 30$  м) вариация температуры  $\delta T$  при различных скоростях ветра. Конфигурация «b». Слева направо – без дефлекторов,  $\alpha = 60^\circ$  и  $\alpha = 45^\circ$

Для того, чтобы характеризовать работу БИГ нами рассчитан общий массовый расход паровоздушной смеси  $G_a$ . Величина расхода является интегральным показателем, отражающим как эффективность теплообмена в БИГ, так и ее аэродинамические качества,

в том числе и при взаимодействии с ветром. При малых углах установки дефлекторов  $\alpha < 45^\circ$  наблюдается некоторое торможение потока. Угол установки дефлекторов  $\alpha \sim 60^\circ$  обеспечивает увеличенный расход воздуха при среднем и сильном ветре.

Мощность теплоотдачи теплоносителя – основной параметр характеризующий тепловую работу градирни. Данный параметр тесно связан, но не эквивалентен полному массовому потоку охлаждающего воздуха  $G_a$  ввиду неоднородности поля скоростей потока в сечении оросителя. На рис. 4 видно, что полная мощность теплоотдачи при угле установки дефлектора  $\alpha = 45^\circ$  (сильное вращение) при скорости ветра  $U_{ref} = 12$  м/сек максимальна несмотря на то, что полный расход воздуха относительно низок при таких же внешних условиях.

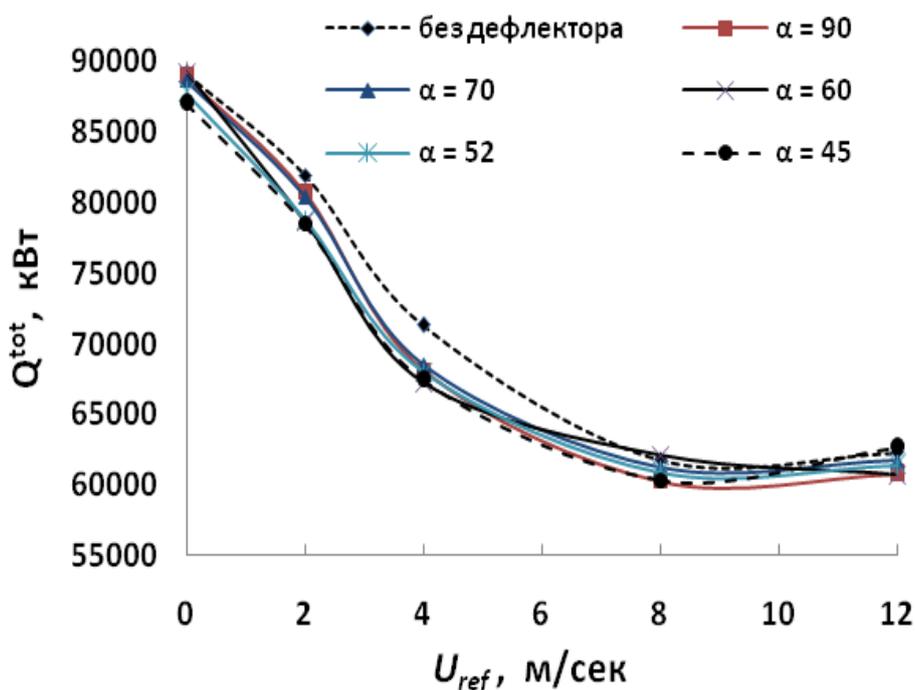


Рис. 4 - Мощность теплоотдачи теплоносителя в градирне как функция скорости ветра; конфигурация «б»

Рассмотрим вариант конфигурации градирни «с» когда ветропреградительные стенки установлены одновременно с дефлекторами в надоросительном пространстве. Такая конфигурация существенно меняет работу БИГ.

Значение критической скорости ветра уменьшается с 8 до 4 – 6 м/сек и одновременно амплитуда функций  $G_a = f(U_{ref})$  уменьшается на величину порядка 3000 кг/сек. Амплитуда изменения мощности теплоотдачи как функции скорости ветра  $Q^{tot} = f(U_{ref})$  уменьшается соответственно.

Данные, представленные на рис.6 показывают, что угол установки дефлекторов  $\alpha = 45^\circ$  обеспечивает наилучшие условия работы БИГ при среднем и сильном ветре. Этот эффект требует более детального анализа и, в частности, исследования влияния геометрических параметров ветрозаградительных стенок на работу БИГ.

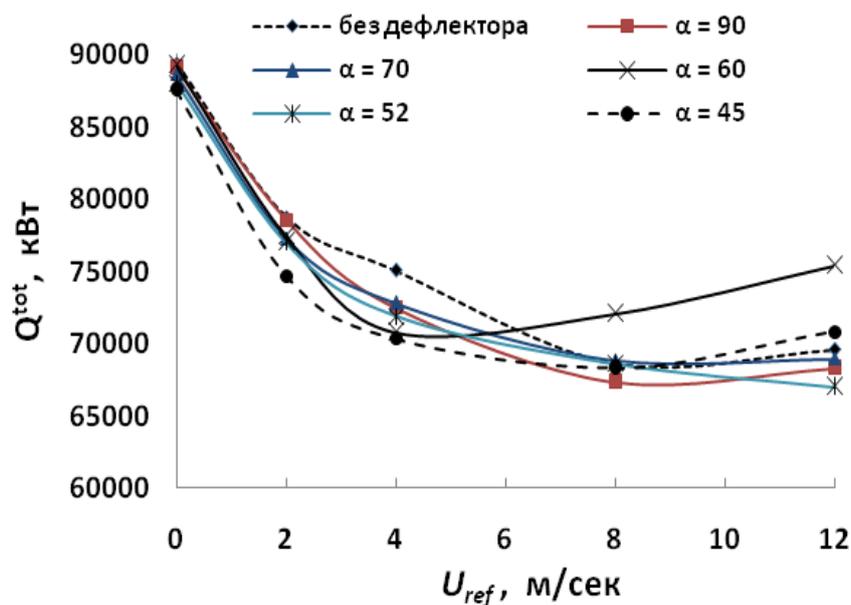


Рис. 5 - Мощность теплоотдачи теплоносителя в градирне  $Q^{tot}$  как функция скорости ветра; конфигурация «с»

Продемонстрирована нелинейная зависимость тепловой производительности БИГ от скорости ветра с минимумом (критическая скорость ветра) при  $U_{cr} \sim 8$  м/с для моделируемой системы. Использование крестообразных ветроперегородок существенно не изменяет критическую скорость ветра, но улучшает ее тепловую работу при умеренном и сильном ветре. Совместное использование ветроперегородок и завихрителей в надоросительном пространстве может повысить эффективность БИГ на величину до 20–30 % при угле установки завихрителей  $\alpha = 60^\circ$ . Расчеты позволяют анализировать аэродинамические структуры, возникающие в БИГ и однородность поля скоростей в области оросителя.

Результаты исследования могут быть полезны для оптимизации конструкции градирен, в том числе и перспективных градирен «гибридного» типа.

#### Список использованных источников

1. Vlasov A. V., Vykhota S. O., Ganzha V. A., et al.. Cooling Tower, Patent of the RB, No. 1293 (1993).
2. ANSYS<sup>®</sup> Academic Research, Release 14.5, Help System, FLUENT, ANSYS, Inc.
3. Petrushik A., Fisenko S., Simulation of natural draft cooling tower performance, in: The 12th IAHR Symposium in Cooling Tower and Heat Exchangers, Sydney, Australia, 2001, pp. 80–86.
4. Власов А.В., Дашков Г.В., Солодухин А.Д., Фисенко С.П.. Исследование внутренней аэродинамики башенной испарительной градирни. *ИФЖ*, 2002, т.75(5), с. 1086-1091.
5. Hemmasian Kashani M. M., Dobrego K. V., Influence of Flow Rotation within a Cooling Tower on The Aerodynamic Interaction with Crosswind Flow, *J. Eng. Physics and Thermophysics*, 2014, Vol. 87, No. 2, 376-383.
6. Солодухин А.Д., Дашков Г.В. и др. Отчет о НИР № 20113267, Институт тепло - и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, 2011.