

УДК 526.24

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БАШЕННЫХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ГРАДИРЕН ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.Д. Солодухин, В.Ф. Давиденко, Н.Н. Столович, В.Д. Тютюма

*Лаборатория термогидродинамики, Институт тепло- и массообмена им А.В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси*

Институт тепло-и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ИТМО НАНБ, г. Минск) в результате многолетних экспериментальных и теоретических исследований и совместных работ с тепловыми электростанциями Республики Беларусь разработал и успешно внедрил комплекс технических решений по существенному повышению охлаждающей способности башенных испарительных градирен тепловых электростанций. В основу этих разработок положены аэродинамические методы оптимизации распределения охлаждающих воздушных потоков на входе и внутри градирен.

Наши натурные исследования течений воздуха в подоросительных пространствах ряда действующих на тепловых электростанциях градирен показали, что на величину расхода входящего охлаждающего воздуха и его распределение в подоросительном пространстве большое влияние оказывают начальные условия входа [1–9]. В большинстве эксплуатируемых градирен наблюдается неравномерное распределение объема поступающего охлаждающего воздуха по вертикальному сечению воздухоподводящих окон, в частности часто имеет место блокировка поступающего воздуха в верхнюю часть окон [1, 2, 4, 6, 8–9]. Обнаружено также неравномерное распределение поступающего в радиальном направлении воздуха по всей площади оросительных устройств градирен [1, 3–4, 6–9]. Эти факторы существенно снижают эффективность работы башенных испарительных градирен.

Для снижения отрицательного воздействия перечисленных факторов в ИТМО НАНБ были предложены способы создания вихревых потоков с вертикальной осью вращения в подоросительном пространстве градирни с помощью вертикальных направляющих устройств, получивших коммерческое название «аэродинамический завихритель» [10–11]. Аэродинамический завихритель представляет собой воздухонаправляющий аппарат, состоящий из вертикальных щитов, расположенных с определенным шагом по периметру градирни и установленных под оптимальным углом к входящему воздушному потоку. В таких градирнях с аэродинамическим завихрителем результирующая скорость воздушного потока помимо вертикальной и горизонтальной составляющих приобретает еще одну компоненту – тангенциальную, что приводит к более глубокому и равномерному проникновению охлаждающего воздушного потока в радиальном направлении. Это увеличивает путь его взаимодействия и приводит к возрастанию времени контакта входящего воздушного потока с разбрызгиваемой охлаждаемой водой. В условиях ветровых нагрузок благодаря завихрителю существенно снижается сквозное продувание подоросительного пространства градирни. Следствием этого является дополнительное (по сравнению с градирней без аэродинамического завихрителя) понижение температуры оборотной воды в градирне на 1 – 2 °С и более в зависимости от режима работы турбины, климатических и погодных условий [11].

Заметим, что выбор конструктивных параметров завихрителя (количество щитов, их геометрические размеры, форма, наличие дополнительных турбулизаторов воздушного потока на поверхности щита и др.) является далеко нетривиальной задачей. Это связано с тем, что, с одной стороны, создание тангенциального входа воздушного потока приводит к уменьшению расхода воздуха, поступающего в градирню, из-за сокращения проходного сечения воздухоподводящих окон. Сказанное выше налагает существенное ограничение на выбор угла установки щитов α , определяющего интенсивность вихревого движения воздуха внутри градирни, ибо не при каждом выбранном угле α удастся компенсировать ухудшение охлаждения воды в градирне из-за уменьшения расхода воздуха, поступающего в подпоросительное пространство градирни.

Поэтому при проектировании аэродинамических завихрителей приходится отыскивать лишь такие конструктивные решения, которые обеспечивают максимально возможную область режимных и погодных параметров, в которых имеет место выигрыш в тепловой эффективности градирни, и минимизируются те режимные параметры и погодные условия, в которых этот выигрыш несущественен. При этом определяют, как правило, средний выигрыш в тепловой эффективности градирни с аэродинамическим завихрителем, например, за сутки, за декаду и т.п., по сравнению с тепловой эффективностью градирен, не оборудованных аэродинамическим завихрителем, при их работе за тот же временной интервал и при тех же режимных и погодных условиях.

На рис. 1 показан экспериментальный образец системы вихревой подачи воздуха в градирню СВП-1, разработанный в ИТМО НАНБ и внедренный на градирне № 1 одной из крупнейших в Республике Беларусь тепловой электростанции – Минской ТЭЦ-4, имеющей электрическую мощность 1000 МВт. Высота башни градирни №1 – 80 м, диаметр основания – 70 м, площадь орошения – 3200 м², максимальная гидравлическая нагрузка – 30000 т/час.



Рис.1. Вертикальные щиты аэродинамического завихрителя, установленного перед воздухоподводящими окнами промышленной градирни Минской ТЭЦ-4. Визуализация воздушных потоков на входе в градирню демонстрирует отсутствие возвратных течений в верхней части воздухоподводящего окна.

В данном экспериментальном образце завихрителя вертикальные щиты имели возможность поворачиваться и устанавливаться с дискретным шагом $7,5^\circ$ на выбранный угол α , например, на определенный оптимальный угол $\alpha_{\text{опт}}$, при котором достигается максимальный выигрыш в увеличении охлаждения воды в градирне при конкретных начальных параметрах течения хладагента и сложившихся метеорологических условиях вблизи градирни.

В [3] показано, что максимальный выигрыш в охлаждении воды может быть реализован лишь в градирне с адаптивной системой управления углами поворота щитов в завихрителе. Сложность построения такой системы очевидна. Поэтому на указанном экспериментальном образце завихрителя был определен угол установки щитов $\alpha_{ко}$, при котором в большинстве случаев обеспечивается выигрыш в дополнительном понижении температуры оборотной воды. Этот угол $\alpha_{ко}$, определялся как среднее значение между границами изменения оптимальных углов для наиболее напряженных сезонных периодов эксплуатации градирен (в Беларуси – обычно летние месяцы июль-август).

Испытания модернизированной градирни №1 с аэродинамическим завихрителем СВП-1 показали, что даже при слабом ветре происходит тангенциальная закрутка входящего потока в подросительном пространстве, который проникает дальше к центру градирни, а не поднимается сразу вертикально вверх, как это имеет место в обычных градирнях. Линии тока устойчивы по всей высоте воздухоподъемного окна, практически отсутствуют застойные зоны и обратные течения в верхней части окон. При этом дополнительное понижение температуры охлаждаемой воды за счет использования завихрителя для погодных условий г. Минска достигало в среднем за сезон 1,3°C [11].

Базируясь на результатах этих испытаний и исследований, был разработан конструктивно упрощенный и удешевленный вариант аэродинамического завихрителя с постоянным углом установки в нем направляющих щитов из стандартных железобетонных конструкций, внедренный на градирнях №3 и №4 Минской ТЭЦ-4.

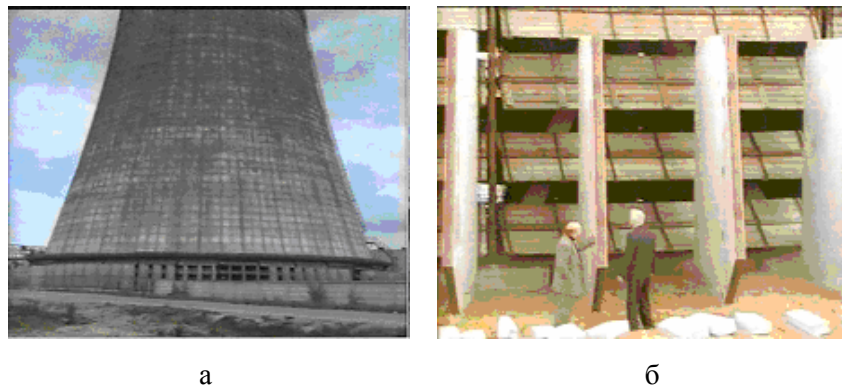


Рис. 2. Промышленный образец аэродинамического завихрителя, внедренный на градирне № 4 Минской ТЭЦ-4 (а). Направляющие щиты установлены стационарно и выполнены из стандартных железобетонных конструкций (б)

Кроме того, был также разработан и внедрен на градирнях Республики Беларусь и другой вариант установки аэродинамического завихрителя. В этом варианте вертикальные направляющие щиты устанавливаются взамен имеющихся на градирнях горизонтальных зимних жалюзийных устройств. Эти вертикальные щиты в теплый период сезона выполняют функцию направляющих элементов аэродинамического завихрителя, устанавливаемых под оптимальным углом, а в зимний период они закрываются.

В частности, такой вариант встроенного аэродинамического завихрителя был установлен на градирне № 1 Гродненской ТЭЦ-2 с площадью орошения 900 м² (рис. 3).



а б
Рис. 3. Внешний вид модернизированной градирни № 1 Гродненской ТЭЦ-2, имеющей в основании квадратную форму (а), с встроенным аэродинамическим завихрителем по периметру воздухоподводящих окон (б)

Аналогичный аэродинамический завихритель был внедрен на одной из градирен Бобруйской ТЭЦ-2 с площадью орошения 900 м^2 . Разработан проект модернизации градирен Мозырьской ТЭЦ-2 с использованием аэродинамического завихрителя.

Заметим, что дополнительное охлаждение циркуляционной воды в градирне летом на $1 \text{ }^\circ\text{C}$ при всех прочих равных условиях приводит к уменьшению удельного расхода условного топлива на $1,2 \div 2,0 \text{ г}$ на выработку каждого киловатт-часа электроэнергии в зависимости от типа турбины и начальных параметров пара [12–13]. Расчет эффективности от установки на градирню №1 Минской ТЭЦ-4 аэродинамического завихрителя показал, что за счет повышения охлаждающей способности градирни экономия топлива только на одном энергетическом блоке мощностью 250 МВт может достигать до 1500 тонн условного топлива за сезон (в зависимости от режимов работы турбин в летний и переходный периоды).

Аэродинамический завихритель рекомендован концерном "Белэнерго" и РУП "БелНИПИЭнергопром" к широкому внедрению на башенных испарительных градирнях, используемых в энергетике Республики Беларусь. Он получила официальное признание в Республике Беларусь (эта работа отмечена Государственной премией Республики Беларусь 2002 года в области техники) и в Российской Федерации как эффективное средство повышения тепловой эффективности градирен. Аэродинамический завихритель экспонировался на международных выставках в 1996 г. в г. Ганновере (Германия) и в 1998 г. на "Экспо-98" в г. Лиссабоне (Португалия), где вызвал большой интерес у специалистов-энергетиков из западных стран и стран Азии.

Существенно также и то, что оборудование градирен аэродинамическими завихрителями может производиться без остановки их работы и больших капитальных затрат. Расчеты и наш опыт внедрения аэродинамических завихрителей показывают, что такая модернизация окупается в течение одного-двух сезонов эксплуатации, а далее приносит прибыль. Для регионов с более теплым климатом, чем в Республике Беларусь, экономическая эффективность от внедрения завихрителя, как показывают расчеты, будет более значительной.

С целью улучшения аэродинамики входящих в градирню воздушных потоков были выполнены исследования известных конструкций жалюзийных устройств из горизонтальных щитов.

Для увеличения эффективности охлаждения воды в градирне в ИТМО НАНБ была предложена и запатентована новая конструкция жалюзийного устройства, обеспечивающая увеличение эффективности охлаждения воды в градирне за счет прироста общего расхода охлаждаемого воздуха, проходящего через воздухоподводящие

окна [14]. Это достигается тем, что нижние жалюзи, как это схематично показано на рис. 4, установлены под углом $5 - 10^\circ$ а верхние – до 35° .

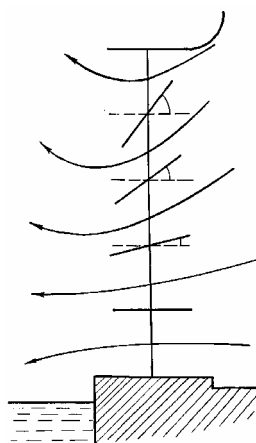


Рис. 4. Схема расположения горизонтальных щитов в зимних жалюзиных устройствах с индивидуальной оптимальной установкой угла поворота щитов и траектории входящих в градирню воздушных потоков

Разработанная в ИТМО НАНБ конструкция механизма оптимального управления горизонтальными зимними жалюзиными устройствами позволяет устанавливать щиты под заданным углом к горизонту и может применяться самостоятельно или в сочетании с вариантом аэродинамического завихрителя. Комбинированное использование аэродинамического завихрителя совместно с предложенной конструкцией жалюзиного устройства увеличивает эффективность охлаждения оборотной воды в градирне за счет улучшения аэродинамики входящего воздушного потока в верхней части воздухоподводящих окон.

Как известно [1, 12], в противоточных градирнях скорость восходящего воздуха вблизи оросителя градирни играет важную роль при испарительном охлаждении. При этом сама скорость воздуха и её распределение в оросителе градирни зависят от состояния приземного слоя воздуха, начальной температуры охлаждаемой воды и от целого ряда геометрических параметров градирни. В подоросительном пространстве противоточной градирни наблюдается целый ряд двумерных эффектов, приводящих к тому, что значительная центральная часть площади оросителя работает при меньшей плотности массового расхода воздуха нежели в периферийной (более удаленной от центра) части оросителя. Оценки и эксперименты свидетельствуют о том, что размер застойной центральной зоны может составлять 36% и более от общей площади оросителя, что соответствует площади круга радиусом $0,6R_{op}$, где R_{op} – максимальный радиус оросителя [1]. В такую застойную зону поступление воздуха идет с помощью вторичных течений и турбулентной диффузии. Следствием этого является значительное недоохлаждение воды в центральной части градирни.

Создание вихревого течения воздуха в подоросительном пространстве градирни с помощью установленных в воздухоподводящих окнах тангенциальных каналов, образованных однонаправленными щитами, способствуют повышению эффективности охлаждения воды. Однако, несмотря на уменьшение размеров застойной зоны благодаря более глубокому проникновению к центру градирни закрученного вихревого воздушного потока, этот поток по пути насыщается теплом и влагой и по этой причине значительная часть оросителя в центральной зоне по-прежнему работает неэффективно. Как показали экспериментальные исследования, проведенные в ИТМО НАНБ на лабораторной модели башенной испарительной градирни, в центре

паровоздушного вихревого образования находится область повышенной температуры и влажности. На рис. 5 представлены радиальные профили распределения температуры на различных расстояниях от поверхности воды в водосборном бассейне лабораторной модели башенной испарительной градирни.

Как видно из представленных графиков, область повышенной температуры занимает от 0,04 м до 0,08 м при радиусе модели (ее вихревой камеры) 0,3 м, что примерно соответствует $(0,15-0,3)R_0$, где R_0 – радиус вихревой камеры. В пересчете на площадь диаметр области повышенной влажности и температуры составляет $(0,16-0,34)S$, где S – площадь поперечного сечения вихревой камеры.

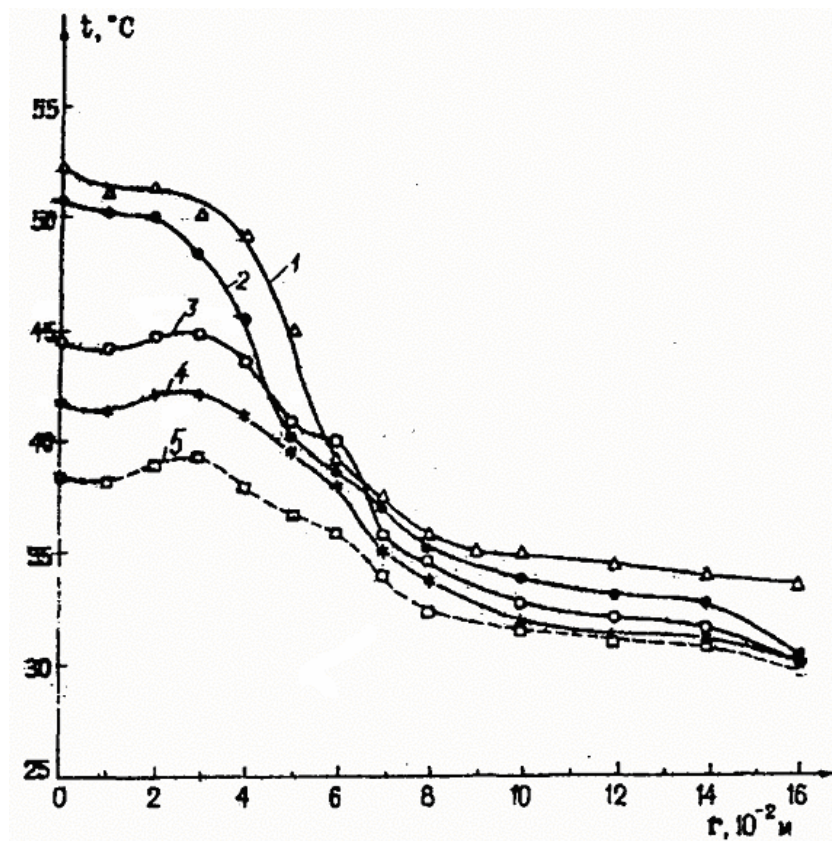


Рис. 5. Радиальные профили распределения температуры на различных расстояниях от поверхности воды в водосборном бассейне лабораторной модели башенной испарительной градирни: кривая 1 относится к распределению температуры на расстоянии 0,06 м; 2 – 0,125 м; 3 – 0,342 м; 4 – 0,45 м; 5 – 0,58 м

В ИТМО НАНБ предложена и запатентована градирня [15], в центральной части оросителя которой выполнено вентиляционное окно, диаметр которого составляет $(0,16 - 0,34)\sqrt{S}$, где S – площадь поперечного сечения оросителя.

Это техническое решение было внедрено при реконструкции градирни № 1 Гродненской ТЭЦ-2 с площадью орошения 900 м^2 . Внешний вид оросителя градирни №1 с вентиляционным окном в его центре, составляющим 7 % от площади орошения, показан на рис. 6.

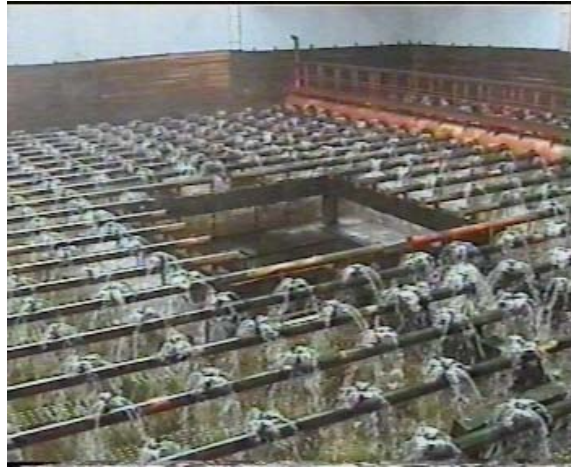


Рис. 6. Вентиляционное окно в центре оросителя градирни № 1 Гродненской ТЭЦ-2

Дальнейшим развитием этого технического решения явилась запатентованная идея оборудования вентиляционного окна специальным устройством, обеспечивающим возможность регулирования расхода проходящего через вентиляционное окно воздушного потока [16]. Регулирующее устройство выполнено в виде плоской горизонтальной крышки диаметром $(0,9 \div 1,1)D$, соосно установленной над вентиляционным окном с зазором, равным $(0,05 - 0,25)D$, где D – диаметр вентиляционного окна (рис. 7)

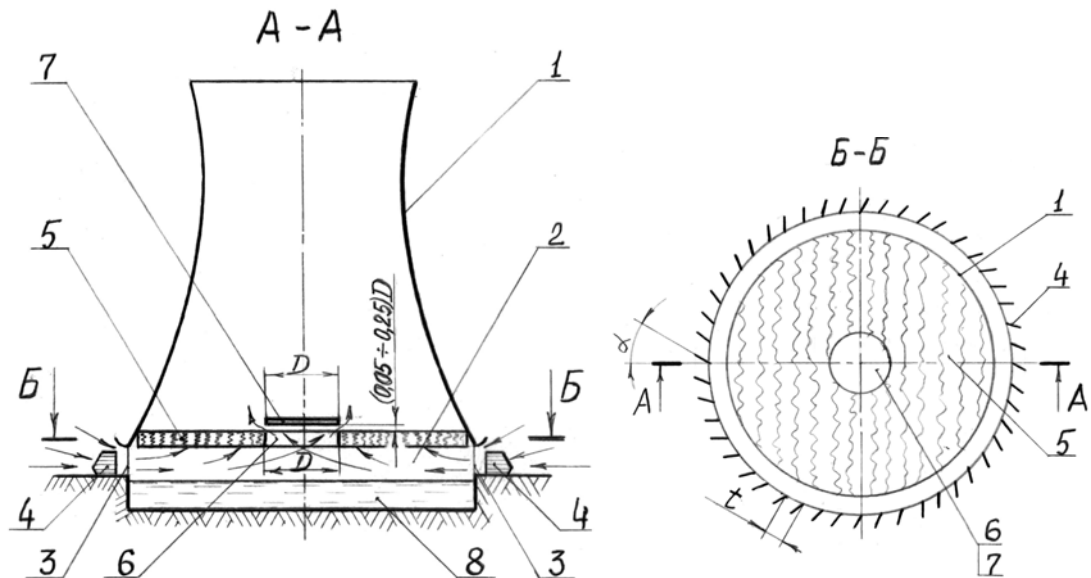


Рис. 7. Схематическое изображение градирни, оборудованной аэродинамическим завихрителем, вентиляционным окном в оросителе и регулирующим устройством для регулирования расхода воздуха в виде плоской горизонтальной пластины с зазором

В ИТМО НАНБ предложен и запатентован способ охлаждения жидкости в башенной градирне, включающий комбинированную подачу охлаждающего воздуха внутрь градирни путем создания естественной и принудительной тяги [17]. От известных способов он отличается тем, что принудительную тягу охлаждающего воздуха создают только в центральной зоне градирни, а в периферийной зоне в дополнение к естественной тяге создают второй поток охлаждающего воздуха путем

эжекции его струей отработавшего воздушного потока центральной зоны градирни, причем расход охлаждающего воздуха, подаваемого принудительно, поддерживают на уровне 5% – 30% от общего расхода охлаждающего воздуха.

Для реализации этого способа внутри вытяжной башни в центре системы орошения градирни установлена вентиляторная градирня, оборудованная на выходе соплом и эжектором (рис.8).

Внутренняя вентиляторная градирня является активным управляющим элементом охлаждающей способности башенной испарительной градирни с обратной связью, в котором оптимально сочетается естественная и дополнительная вынужденная тяги внутри градирни. Принудительную тягу охлаждающего воздуха создают только в центральной зоне градирни (А), а в периферийной зоне (С) в дополнение к естественной тяге создают второй поток воздуха (В) путем эжекции его струей отработавшего воздушного потока центральной зоны градирни.

При этом удачно сочетаются преимущества вынужденной тяги и естественной конвекции, в результате чего суммарный комбинированный эффект значительно превосходит сумму эффектов от каждой составляющей в отдельности.

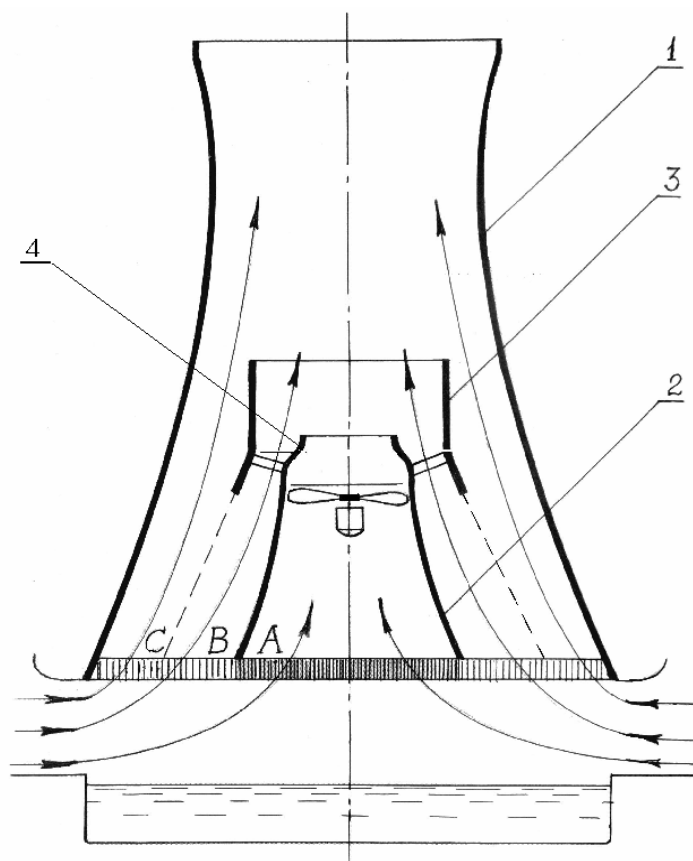


Рис. 8. Схематическое изображение башенной градирни, оборудованной модулем принудительной подачи воздуха: 1 – башня градирни; 2 – вентиляторная миниградирня; 3 – эжектор; 4 – сопло

В обычном режиме, когда тепловая нагрузка на градирню небольшая, поступление воздуха в градирню обеспечивается за счет естественной тяги. При этом вентилятор находится в выключенном состоянии. При увеличении тепловой нагрузки,

когда охлаждающая способность градирни за счет естественной тяги уже не обеспечивает требуемый режим охлаждения, включается вентилятор. При этом за счет принудительной тяги резко увеличивается подача свежего воздуха в центральную зону «А» оросителя, и тем самым повышается охлаждающая способность градирни в этой зоне. Проходя через вентилятор и сопло 4 (рис. 8), отработавший воздушный поток направляется в эжектор 3, в котором он смешивается с воздухом, эжектируемым через кольцевой канал из зоны «В». В результате в зоне «В» происходит увеличение объемного расхода, проходящего через ороситель воздуха. При этом в зоне с хорошим поступлением свежего воздуха «С» движение воздуха обеспечивается преимущественно за счет естественной тяги.

В заключение отметим, что комплекс описанных выше технических решений по улучшению работы градирен построен по принципу наращивания и взаимного дополнения устанавливаемого на градирню оборудования, порядок установки которого независим друг от друга и может осуществляться как в действующих градирнях при их плановых ремонтах и реконструкциях, так и при проектировании новых башенных испарительных градирен тепловых и атомных электростанций.

Литература

- [1] Власов А.В., Дашков Г.В., Солодухин А.Д., Фисенко С.П. Исследование внутренней аэродинамики башенной испарительной градирни. // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75. №5. С. 64–68.
- [2] Власов А. В., Воронов Е. О., Дашков Г.В., Солодухин А.Д, Фисенко С.П. Особенности работы башенных испарительных градирен в летний период и аэродинамика воздушных потоков вблизи них // Теплообмен – 95. Мн.: ИТМО НАНБ, 1995. С. 23–26
- [3] Солодухин А.Д., Столович Н.Н., Тютюма В.Д. Исследование влияния ветровых воздействий на эффективность работы башенной испарительной градирни при закрутке входящих в нее воздушных потоков. // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках. Тезисы докладов Второй Российской конф. 15–17 марта 2005 г. М.: изд. МЭИ, 2005. С. 205–206. (Матер. конф. на CD, гос. регистр. номер 0320500321, papers: s.510.pdf, 7 стр.).
- [4] Власов А.В., Давиденко В.Ф., Дашков Г.В., Солодухин А.Д., Столович Н.Н., Тютюма В.Д. Использование закрученных воздушных потоков для повышения тепловой эффективности башенных испарительных градирен тепловых и атомных электростанций. // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках. Тезисы докладов Второй Российской конф. 15–17 марта 2005 г. М.: изд. МЭИ, 2005. С. 203–204. (Матер. конф. на CD, гос. регистр. номер 0320500321, papers: s.509.pdf, 4 стр.).
- [5] Власов А.В., Давиденко В.Ф., Дашков Г.В., Мартыненко О.Г., Солодухин А.Д., Столович Н.Н., Тютюма В.Д. Интенсификация испарительного охлаждения в башенных градирнях при закрутке входных воздушных потоков. // Труды IV Минского международного форума. Т. 10. Мн.: ИТМО НАНБ, 2000. С. 192–201.
- [6] Dashkov G.V., Fisenko S.P., Soloduchin A.D., Vlasov A.V. Optical diagnostics of flow swirling in cooling towers. // International Seminar on Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow. IMechE Conference Transaction, London, 1996. p. 565-573.
- [7] Петручик А. И., Солодухин А. Д., Столович Н. Н., Фисенко С. П. К анализу экспериментальных данных о тепловой эффективности башенной испарительной градирни // Известия РАН. Энергетика, 2000, № 6. С. 142 – 149.

- [8] Vlasau A.V., Davidenko V.F., Dashkov G.V., Solodukchin A.D., Stolovich N.N., Tjutjuma V.D.. The using of swirling air flows for increasing of the thermal efficiency of evaporative cooling of thermal and atomic power plants. // Heat Transfer Research, 2006, Vol. 37 No 6, pp. 495–500..
- [9] Власов А.В., Давиденко В.Ф., Дашков Г.В., Дикун В.С., Солодухин А.Д., Тютюма В.Д., Фисенко С.П. Оптимизация внутренней аэродинамики башенных испарительных градирен. // V Минский международный форум по тепло- и массообмену. 24–28 мая 2004 г. Тезисы докладов и сообщений. Т. 2. Мн.: ИТМО НАНБ, 2004. С. 278–279 (Матер. конф. на CD, гос. регистр. номер 0320500321, papers: секция 08, докл. 09.pdf, 12 стр.).
- [10] Градирня. Патент Республики Беларусь ВУ 1293. // Власов А.В., Выхота С.О., Ганжин В.А., Давиденко В.Ф., Дашков Г.В., Дикун В.С., Жданов В.Л., Слижевский Ю.М., Павлюкевич Н.В., Солодухин А.Д., Фисенко С.П., Хомич А.С. Оpubл. 16.09.1996 г.
- [11] Власов А.В., Давиденко В.Ф., Дашков Г.В., Мартыненко О.Г., Солодухин А.Д., Столович Н.Н., Тютюма В.Д. Аэродинамический завихритель для башенных испарительных градирен // Наука – энергетике: Сб. научн. тр. Мн.: ИТМО НАНБ, 1999. С. 118 –124.
- [12] В.С. Пономаренко, Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1998. – 372 С.
- [13] Калатузов В.А. Влияние эффективности систем технического водоснабжения с градирнями на эксплуатационные показатели электростанций // Энергетик.– 2002.– №1.– С. 19–24.
- [14] Градирня. Патент Республики Беларусь ВУ 2028. // Власов А.В., Жданов В.Л., Павлюкевич Н.В., Писарук И.И., Солодухин А.Д., Слежевский Ю.М., Фисенко С.П., Хомич А.С. Зарегистр. 14.10.1997 г.
- [15] Градирня. Патент Республики Беларусь ВУ 2447. // Власов А.В., Давиденко В.Ф., Дашков Г.В., Мартыненко О.Г., Родзевич В.А., Солодухин А.Д., Столович Н.Н., Тютюма В.Д., Дикун В.С., Хасеневич Л.С. Зарегистр. 12.06.1998 г.
- [16] Градирня. Патент Республики Беларусь ВУ 10380. Бачуринский А.Н., Власов А.В., Давиденко В.Ф., Дашков Г.В., Маленко Г.Л., Пашук С.В., Петручик А.И., Солодухин А.Д., Столович Н.Н., Тютюма В.Д. Зарегистр. 12.06.1998 г.
- [17] Способ охлаждения жидкости в градирне и башенная градирня для его осуществления. Патент Республики Беларусь ВУ 9493. Бачуринский А.Н., Власов А.В., Давиденко В.Ф., Дашков Г.В., Павлюкевич Н.В., Пашук С.В., Солодухин А.Д., Тютюма В.Д. Зарегистр. 30.08.2007 г.