

поверхностях нагрева работающего котла. Как было показано выше, эффективность водяной обдувки зависит от теплофизических и прочностных характеристик золовых отложений. Исходя из этого, оптимальные режимы очистки целесообразно уточнять для каждого конкретного котла.

**Выводы.** Общей рекомендацией для всех котлов, сжигающих канско-ачинские угли, является такая организация топочного режима, при которой максимально ограничивается образование и рост прочных железистых отложений, не удаляемых водяной обдувкой:

интенсификация теплообмена в топочной камере котлоагрегата путем реконструкции горелочных устройств либо организации вихревого сжигания, что предотвращает образование на топочных экранах твердых сульфатно-связанных и железистых отложений;

оптимизация схемы пылеприготовления с переходом на более грубый помол топлива;

принятие мер к ликвидации температурных и тепловых неравномерностей в топочной камере котлоагрегата, приводящих к образованию высокотемпературного ядра, расплавлению минеральной части угля и последующему заносу конвективных поверхностей.

При выборе режимов обдувки необходимо также учитывать скорость роста золовых отложений. Быстрый рост отложений приводит к их спеканию и оплавлению поверхностного слоя. Наличие оплавленного слоя значительно снижает эффективность водяной обдувки.

### Литература

1. Тиймка Т.Е., Пообус А.П. Влияние свойств золовых отложений на тепловосприятие топочных поверхностей нагрева // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы паровых котлов: тез. докл. 4-й Всесоюз. конф. – Таллин, 1986. – Т.4. – С. 78–83.



УДК 626.175.3:627.1

Б.И. Кропоткин, О.И. Шеденко

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДОЗАБОРНО-ВОДОВЫПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ ТЭС И АЭС

*Проведен анализ комплексных натурных исследований, состоящих из подводного обследования, измерений температуры воды на сбросном и водозаборном каналах и визуального состояния гидротехнических сооружений, по результатам которых выполняется проект реконструкции водоподводящей и водозаборной галерей.*

**Ключевые слова:** водовыпускной канал, консольный водосброс, глубокий щелевой водозабор, водохранилище-охладитель, температурная стратификация, разноплотностные потоки.

B.I. Kropotkin, O.I. Shedenko

### THE RESEARCH RESULTS OF WATER-INTAKE AND WATER-DISCHARGE CONSTRUCTIONS IN THERMAL POWER-STATION NUCLEAR POWER PLANT

*The analysis of integrated full-sized studies, consisting of the underwater survey, water temperature measurements on the discharge and water intake canals and the hydraulic constructions visual condition is conducted. On the basis of this research the project of the water-supply and water-intake galleries reconstruction is carried out.*

**Key words:** water outlet channel, console spillway, deep slit water-intake, reservoir-cooler, temperature stratification, flows of different density.

**Введение.** При использовании искусственно созданных или естественных водоемов в системах тепводоснабжения крупных тепловых и атомных электростанций в качестве охладителей, из-за введения в них большого количества низкопотенциального тепла посредством сброса больших объемов нагретой воды, возникает важнейшая проблема – сохранение существующего гидротермического режима или приближение вновь формируемого к естественно-бытовому [1, 2].

**Цель работы.** Повышение экономичности работы электрических станций.

Известно, что на формирование гидротермического режима в таких водоемах большое влияние, как правило, оказывают не только природные неуправляемые факторы (солнечная радиация, испарение, морфологические особенности водоема и др.), но и факторы, которыми можно регулировать в желаемых направлениях (гидравлические режимы работы водовыпускных и водозаборных сооружений, различные устройства, регулирующие потоки и т. п.). И поэтому знание и прогноз особенностей формирования стратифицированных течений, влияющих, в свою очередь, на гидробиохимические режимы водохранилищ-охладителей, позволят целенаправленно подходить к их регулированию и должны учитываться в эколого-экономическом обосновании проектов ТЭС и АЭС.

Но помимо экологических аспектов существует еще так называемый показатель экономичности работы станции. Одновременное соблюдение нормативных параметров по двум вышеуказанным направлениям весьма проблематично и, как правило, на практике не выполняется.

Существенными показателями эффективности работы системы техводоснабжения, а в целом и электрической станции, являются эксплуатационные затраты, капиталовложения в строительство системы и т.д. В эксплуатационных затратах решающую роль играет температура охлажденной воды, являющаяся основным параметром в определении прочих затрат. Так, например, повышение температуры воды, поступающей в конденсаторы турбин электростанции, на  $1^{\circ}\text{C}$  по сравнению с расчетной обуславливает пережог условного топлива на выработку  $1\text{кВт/час}$  электроэнергии в пределах  $0,5\div 1,0$  грамм. В связи с этим для наиболее экономичной работы станции и с учетом минимального воздействия потока нагретой воды на естественный температурный режим водоема, т.е. с целью предотвращения перегрева водохранилища-охладителя, используют различные схемы выпуска теплой воды: компактной струей (каналом), комбинированным способом, т.е. сброс воды каналом с одновременной работой брызгальных установок или же рассредоточением потока широким фронтом с помощью различных распределительных устройств и сооружений. Но для выбора оптимального выпуска теплой воды в водоем, на стадии проектирования систем техводоснабжения, необходимо выполнение расчетно-исследовательских работ по сопоставлению различных компоновочных и конструктивных вариантов водозаборно-водовыпускных сооружений. Решением этих вопросов занимаются во многих странах мира.

В последние десятилетия стали уделять внимание выпуску теплой воды в водоем, широким фронтом включая и совмещение его с глубинным водозабором.

Так исследовалось сопряжение теплого и холодного потоков Нововоронежской АЭС [3] для совмещенного водозаборно-выпускного сооружения. В качестве водовыпускного сооружения, расположенного над глубинным водозабором, представляющего собой донную галерею с входными водозаборными окнами переменной высоты, использовалась глухая, затопленная на  $1\text{м}$  стенка с длиной фронта перелива  $147\text{м}$ . Расход циркуляционной воды на АЭС соответствовал  $54\text{ м}^3/\text{с}$ , температурный перепад –  $10^{\circ}\text{C}$ . Площадь водохранилища составляла  $4,9\text{ кв. км}$ , средняя глубина около  $6\text{ м}$ , максимальная –  $8,0\text{ м}$ .

Исследованная конструкция не способствовала достижению основной цели – исключению рециркуляции подогретой воды в водозабор, которая исчезает только при удельном расходе менее  $0,25\text{ м}^2/\text{с}\cdot\text{м}$ , что предопределяет ширину водовыпускного фронта не менее  $216\text{ м}$ . При такой ширине водовыпускного фронта снижается эффект инерционной силы в направлении течения теплой воды от водозабора и при нагоне ее ветрами неблагоприятного направления – происходит перемешивание потоков теплой и холодной воды водохранилища-охладителя.

Решением этих вопросов занимались в Сибфилиале ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева посредством фильтрующей дамбы, расположенной как над глубинным водозабором, так и на удалении от него.

Исследования сопряжения потоков теплой и холодной воды проводились для условий Экибастузской ГРЭС-1 мощностью  $4000\text{МВт}$  [4], результаты которых впоследствии были внедрены в проект и строительство. Циркуляционный расход составлял  $140\text{ м}^3/\text{с}$ , температурный перепад –  $10^{\circ}\text{C}$ . Удельный расход, при ширине водовыпускного фронта  $400\text{ м}$ , был равен  $0,35\text{ м}^2/\text{с}$  на  $1\text{пог.м}$ . Площадь водохранилища-охладителя –  $18,9\text{ кв. км}$ , средняя глубина –  $4,6\text{ м}$ , в районе водозабора –  $8,5\text{ м}$ .

Несмотря на значительные отступления при строительстве от проектных условий и условий эксплуатации водохранилища и водозаборно-водовыпускного сооружения (около  $40\%$  всего сбрасываемого расхода поступает через образовавшиеся прораны), как показали натурные исследования, совмещенное сооружение работало удовлетворительно [5, 6], т.е. даже в период жаркой декады, когда температура воздуха достигала  $33\text{--}34^{\circ}\text{C}$ , температура воды на выходе из глубинного водозабора составляла  $25\text{--}26^{\circ}\text{C}$  (при критической –  $31,5^{\circ}\text{C}$ ) при работе шести блоков (рис.1).

Другой вид сопряжения – водовыпускной канал – водохранилище-охладитель для условий Экибастузской ГРЭС-2 (циркуляционный расход которой составлял 120 м<sup>3</sup>/с, глубина в районе водозабора – 12,5 м), представлял собой раструб, в котором с целью равномерного распределения потока теплой воды по ширине был запроектирован затопленный банкет длиной 150 м и высотой 1,0 м, обеспечивавший плавное растекание потока по поверхности водоема. Но, как показали исследования, такая конструкция не обеспечивает равномерного распределения потока нагретой воды в месте сопряжения с массами водохранилища-охладителя. Образуются транзитный поток, вертикальные и горизонтальные водоворотные зоны, благоприятствующие перемешиванию с холодной. Таким образом, водовыпуск, соответствующий вышеперечисленным требованиям, существует только для управления бурными потоками [7]. Снижение температуры воды в верхнем слое ведет к повышению температуры воды на глубинном водозаборе, а это в свою очередь ухудшает экономические показатели ГРЭС.

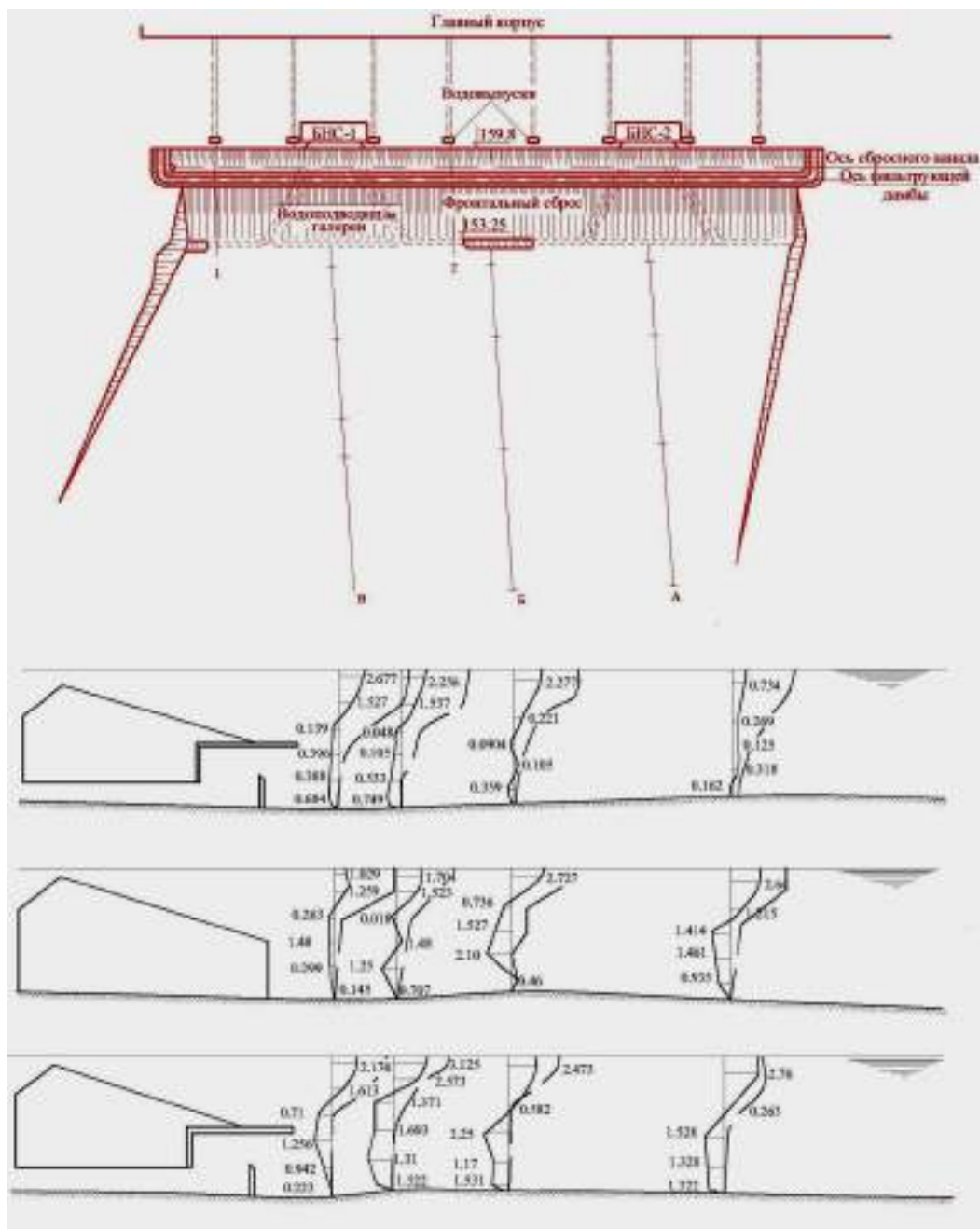


Рис.1. Условия эксплуатации водохранилища

На основе полученных результатов была разработана конструкция водовыпускного устройства, имеющего вид раструба, и сооруженного в нем объемного растекателя треугольной или криволинейной (выпуклой) в сечении формы. Водовыпуск, выполненный на уровне изобретения [8] и внедренный в систему техводоснабжения на Экибастузской ГРЭС-2, обеспечивает равномерное распределение удельных расходов, равных  $0,8 \text{ м}^3/\text{с}$  на  $1 \text{ пог. м}$  в створе сопряжения без образования водоворотных зон и эжекции холодной воды из нижних слоев водохранилища-охладителя, т.е. в ближней зоне водовыпуска образуется четко выраженная температурная стратификация.

Но, к сожалению, вышеуказанные конструкции водовыпускных сооружений при больших колебаниях уровней воды в водохранилище-охладителе ( $3 \text{ м}$  и более) не обеспечивают плавного сопряжения потоков из-за образования, вследствие перепада уровней канал-водохранилище, транзитной струи, влекущей к образованию водоворотных зон. Это обстоятельство приводит к интенсивному перемешиванию потоков из-за вовлечения на начальном участке холодной воды вследствие турбулентности в ближней зоне, обусловленной высокими скоростями.

Для уменьшения эжекции теплой воды в глубинный водозабор или ее исключения решили применять фильтрующе-переливную каменнонабросную дамбу, прототипом которой явилась фильтрующая дамба, используемая в настоящее время на Экибастузской ГРЭС-2. Исследования проводились для условий Березовской ГРЭС-1 (ГРЭС КАТЭКа) мощностью  $6400 \text{ МВт}$ . Площадь водохранилища-охладителя по зеркалу воды составляла  $33,4 \text{ кв. км}$ . Наибольшая глубина  $15,0 \text{ м}$ , средняя –  $5,8 \text{ м}$ , в районе водозабора –  $10 \text{ м}$ . Амплитуда колебания горизонта воды до  $3 \text{ метров}$ . Максимальный циркуляционный расход составлял  $200 \text{ м}^3/\text{с}$ .

При исследовании этого варианта водовыпуска для устойчивости его от размыва при перепадах уровней до  $3 \text{ метров}$  пропускался удельный расход в  $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$  на  $1 \text{ пог.м}$ , а для определения процесса формирования устойчивости температурной стратификации на начальном участке удельные расходы составляли от  $0,5$  до  $0,87 \text{ м}^3/\text{с}\cdot\text{м}$  при температурных перепадах от  $5$  до  $12^\circ\text{C}$ .

В результате выполненных исследований были выявлены оптимальные конструктивные и гидравлические параметры водовыпускного сооружения, совмещенного с глубинным водозабором. Четко выраженная стратификация с максимальным температурным градиентом формируется при длине водовыпускного фронта в  $350\text{--}400 \text{ м}$ , ширина водозаборного фронта при этом составляла  $400 \text{ м}$ . Толщина верхнего слоя в зависимости от колебания уровней воды находилась в пределах  $0,8\text{--}3,0 \text{ м}$ , что гарантировало водоотбор только из нижнего слоя (рис. 2).

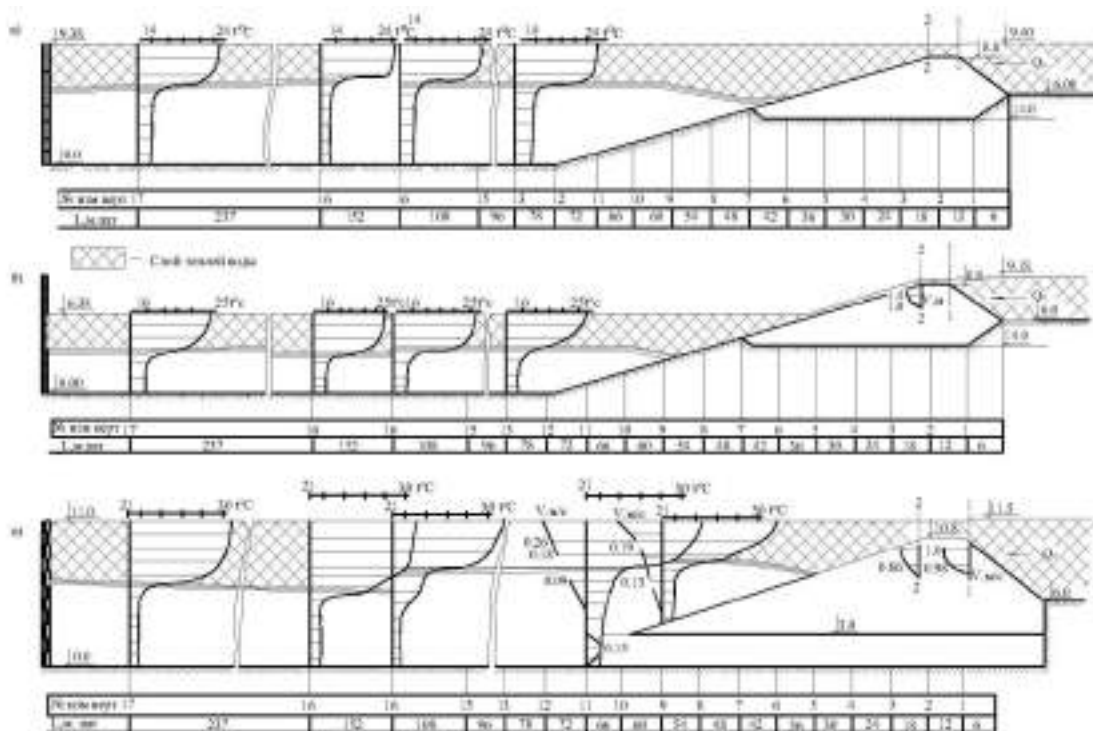


Рис. 2. Конструктивные и гидравлические параметры водовыпускного сооружения

Для определения критического положения границы раздела слоев, т.е. такого положения, при котором теплая вода только начинает вовлекаться в глубинный водозабор, выполнялись расчеты по зависимости [9]

$$\frac{\Delta h}{h_{вх}} = 0,5 \frac{v_{вх}^2}{g \varepsilon h_{вх}},$$

где  $v_{вх}^2$  – средняя скорость во входном сечении глубинного водозабора, м/с;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\varepsilon = \frac{\Delta \rho}{\rho_2} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_3}$  – относительная разность плотностей слоев;  $h_{вх}$  – высота входного отверстия, м;  $\Delta h = h_2 - h_1$  – расстояние от кромки козырька глубинного водозабора до условной поверхности раздела слоев, м;  $h_2$  – толщина нижнего холодного слоя, м;  $h_1$  – толщина верхнего слоя, м.

Граница раздела слоев для максимального перепада температур 10°С на глубине 1,3 м, а для минимального перепада 5°С – на глубине 2,1 м.

По сравнению с фильтрующей дамбой, используемой на Экибастузской ГРЭС-1, исследованная конструкция имеет ряд преимуществ. Во-первых, она способствует образованию устойчивой двухслойной температурной стратификации в водохранилище-охладителе толщиной верхнего нагретого слоя до 3 метров в районе водовыпуска при колебаниях уровней воды до 3 метров. Во-вторых – отсыпка тела дамбы осуществляется скальным грунтом размерами 0,1–0,5 м, за исключением защитного слоя низовой грани и гребня дамбы от размыва, которые отсыпаются сортированным камнем размерами 0,6÷0,8м. В-третьих – в случае кольматации перелив через дамбу происходит без нарушения стратификации. Данная конструкция водовыпускного сооружения, разработанная на уровне изобретения [10], внедрена в проект Березовской ГРЭС-2.

**Выводы.** Таким образом, создание температурной стратификации в водоемах, используемых в системах техводоснабжения ТЭС и АЭС как охладители, путем рационального взаимного расположения водовыпускных и водозаборных сооружений способствует наиболее полному использованию площади водохранилища-охладителя с максимально возможной отдачей на границе раздела вода-воздух, а в результате и экономичности работы электрических станций.

#### Литература

1. Макаров И.И. Исследование стратифицированных течений, возникающих при сбросе подогретой воды тепловыми и атомными электростанциями // Изв. ВНИИГ. – Л., 1972. – Т. 100. – С. 120–134.
2. Макаров И.И. Особенности формирования гидротермического режима в нагруженных водохранилищах-охладителях и упрощенные способы расчета охлаждения воды // Тр. координ. совещ. по гидротехн. – Вып. 105. – Л., 1975. – С. 46–50.
3. Нагобат Э.А., Попов А.М. Модельные гидротермические исследования водохранилища-охладителя и фрагмента водозаборно-выпускного сооружения Нововоронежской АЭС // Тр. координ. совещ. по гидротехн. ВНИИГ. – Вып. 105. – Л., 1975. – С. 79–83.
4. Пахомов В.А., Дудников А.Н. Результаты фрагментарных исследований совмещенной схемы водозаборно-выпускного сооружения Экибастузкой ГРЭС-1 // Тр. координац. совещ. по гидротехн. – Вып. 115. – Л., 1977. – С. 225–227.
5. Результаты натурных исследований водозаборно-выпускного сооружения Экибастузкой ГРЭС-1 (в начальный период эксплуатации) / И.И. Макаров [и др.]. – Л., 1984. – 11 с. – Деп. в Информэнерго, № 1474 энд. 84.
6. Натурные исследования совмещенного водозаборно-выпускного сооружения Экибастузкой ГРЭС-1 / В.П. Демшин [и др.] // Изв. ВНИИГ. – Л., 1986. – Т. 192. – С. 82–87.
7. Пахомов В.А., Елисеева А.А. Водовыпускное устройство // Информлисток Краснояр. ЦНТИ. – Красноярск, 1987. – № 480-87. – 0,20 п.л.
8. А.с.1463855 СССР. Кл. E02 В 8/08. Устройство для выпуска теплой воды в охлаждающий водоем / В.А. Пахомов, А.М. Бронштейн / Открытие. Изобретение. – 1989. – №9.
9. Указания по гидравлическому расчету и моделированию глубинного водозабора из стратифицированных водоемов. ВСН 27-70./ВНИИГ.– Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1970. – 85 с.
10. А. с. 1483013 СССР, Кл. E 02 В 8/02. Водовыпуск / В.А. Пахомов, Б.И. Кропоткин, А.А. Елисеева [и др.] // Открытие. Изобретение.–1989. – №20.