

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621. 039:532:533.6

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЧИСТКИ ВОДОСБОРНЫХ  
БАССЕЙНОВ БАШЕННЫХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ГРАДИРЕН**

© 2015 г. О.Л. Кольченко\*, И.А. Нагибина\*, Ю.М. Матевосян\*,  
Г.В. Домрина\*\*, И.П. Тюменев\*\*\*

\* *Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.*

\*\* *Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт, Донской государственный аграрный университет, Новочеркасск, Ростовская обл.*

\*\*\* *Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» Ростовская АЭС, Волгодонск, Ростовская обл.*

Приведено теоретическое обоснование неэнергоемкого способа создания вращательного движения в водосборных бассейнах современных башенных испарительных градирнях с целью предотвращения выноса твердых загрязняющих частиц за пределы бассейна и их автоматического сбора. Это позволит минимизировать затраты на очистку, значительно снизить нагрузку на вращающиеся сетки и фильтры. Описан способ создания такого движения и пути модернизации проектных решений.

*Ключевые слова:* вода, скорость, расход, поток, струя, вращательное движение, водосборный бассейн, градирня.

Поступила в редакцию 22.05.2015

Современное развитие атомной энергетики в России связано с крупномасштабным строительством АЭС и применением серийных энергоблоков мощностью 1000 – 1200 МВт, отвечающих повышенным требованиям по безопасности, самодостаточности и независимости работы.

Оборотное техническое водоснабжение блоков № 1-4 Ростовской АЭС, по первоначальному проекту, базировалось на водоеме-охладителе. Однако, его длительная консервация и эксплуатация при блоках №1 и №2 без обслуживания (отсутствие земснаряда), непроектное исполнение выходной части сбросного канала привели к заилению водоема, снижению полезного объема, зарастанию камышом прибрежной акватории, возникновению застойных зон. При этом, как следствие – снизилась эффективность испарительного охлаждения, и возник высокий риск нормальной эксплуатации при подключении к водоему блоков №3 и №4. Поэтому было принято решение для блоков №3 и №4 РОАЭС использовать оборотную систему технического водоснабжения с применением башенных испарительных градирен высотой 170 м, диаметром основания 143,6 м и полезной площадью орошения свыше 14000 м<sup>2</sup>. Охлаждение происходит в результате теплообмена между водой и воздухом, который движется в направлении, противоположном падающей охлаждаемой воде. Охлаждающий воздух в башенную испарительную градирню поступает благодаря естественной тяге. Охлаждаемая вода расходом свыше 50 м<sup>3</sup>/с стекает в водосборный бассейн, с внутренним диаметром D = 135,2 м и из него по водоотводящему каналу шириной 44 м подается в аванкамеру объединенной насосной станции (далее – ОНС).

Атмосферный воздух, поступающий через окна внутрь градирни, является источником загрязнения. Вместе с ним поступают частицы пыли, песка, глины, ила,

зерен, мелкие осколки камней, пластика и других нерастворимых веществ.

По своей сути градирия представляет собой влажный воздушный фильтр. Все твердые частицы, транспортируемые воздухом во взвешенном состоянии, пройдя в испарительной части через плотно установленные элементы оросителей, высокоинтенсивную зону орошения и систему каплеуловителей, обязательно соединятся с водой и вместе с ней стекут в водосборный бассейн. Отметка дна водосборного бассейна ниже отметки дна водоотводящего канала всего лишь на 0,3 – 0,4 м (высота наносоотбойного порога). Для пропуска расхода охлажденной воды через начальный участок водоотводящего канала необходим напор  $H = 0,81\text{ м}$ , рассчитываемый по формуле пропускной способности водослива с широким порогом [1]:

$$Q = mb(2gH^3)^{0,5};$$

где  $m=0,35$  – коэффициент расхода водослива;

$b=44,0$  м – ширина водосливного фронта.

Такая небольшая глубина воды в водосборном бассейне предопределяет ее высокие скорости подхода и вынос в аванкамеру ОНС значительный объем не успевших осесть в водосборном бассейне минеральных частиц.

Применение и строительство градириен такого типа в нашей стране только начато, поэтому информация об опыте их эксплуатации практически отсутствует.

Приблизительные расчеты по среднегодовой запыленности воздуха  $q=0,2$  мг/м<sup>3</sup> в районе г. Волгодонска [2], показывают, что через градирию за 18 месяцев может пройти около 200 т твердых частиц. Это без данных по суховеям и пыльным бурям, характерным для нашего региона, наличию рядом со станцией площадей пахотного земледелия и автотрассы с интенсивным движением.

В инструкции по эксплуатации градири и, в частности, водосборного бассейна, указано что, во время останова блока необходимо производить очистку дна бассейна механически и вручную. При этом не указана технология сбора мусора со дна аванкамер (отметка -14,0) и его подъем на поверхность.

В настоящей работе предлагается применить ряд мероприятий по совершенствованию эксплуатации градири, позволяющих предотвратить вынос твердых частиц за пределы водосборного бассейна и минимизировать затраты на их уборку, значительно снизить нагрузку на вращающиеся барабанные сетки и фильтры.

В первую очередь, необходимо увеличить глубину воды в водосборном бассейне на 0,8-1,0 м до  $h=(1,8 - 2,0)$  м (высота стенок бассейна от дна 2,35 м) за счет повышения порога перед водоотводящим каналом. Так же возможен вариант установки плоских щитов, высотой 0,8-1,0 м, в 6-метровых пролетах между А-образными опорными рамами, находящихся в створе водосливного фронта. На такую же высоту необходимо поднять «0» порога переливных окон в секторе 2, с возможной заменой переливных окон на автоматический водосброс или сифон.

Во-вторых, в подъемных шахтах, ближе к расчетной поверхности воды в водосборном бассейне, выполнить прямоугольные отверстия и оборудовать их плоскими управляемыми затворами. Отверстия должны быть направлены тангенциально в одну сторону для пропуска через них части побудительного расхода, обеспечивающего вращательное движение внутри бассейна.

При вращательном движении жидкости в цилиндрической емкости свободная поверхность приобретает форму параболы (рис.1). За счет разницы в отметках между центром и периферией вращения  $\Delta h$  возникает поперечная циркуляционная скорость  $V_{п}$ . У стенок бассейна вертикальный нисходящий поток, при достижении дна,

перпендикулярно поворачивает к центру. В сумме с побуждающей, тангенциальной скоростью  $V_T$ , донный вектор скорости  $V_D$  возрастает и возникает сложное спиралевидное движение, которое по всей площади перемещает по дну осевшие твердые частицы к центру.

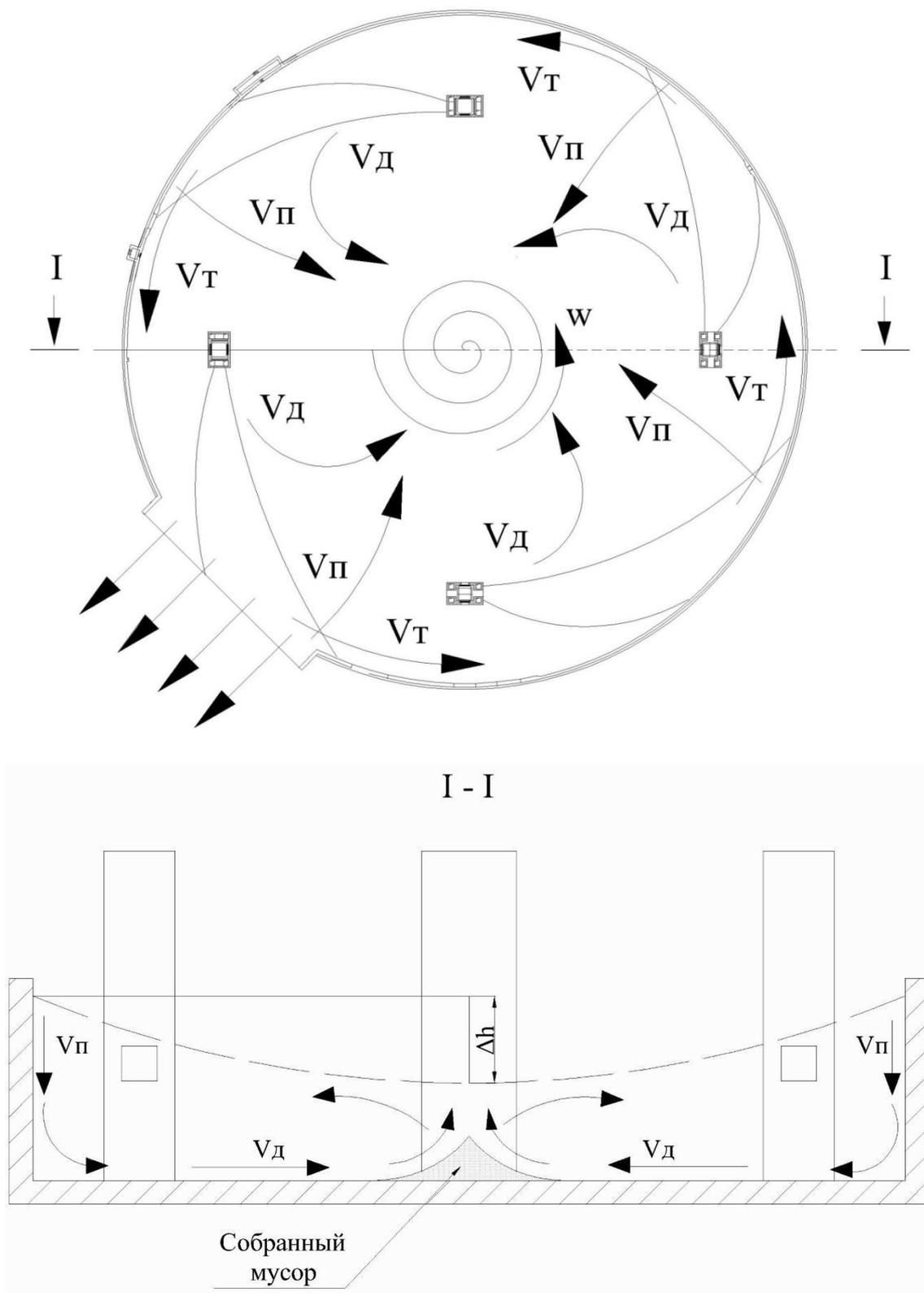


Рис. 1. – Расчетная схема вращательного движения в водосборном бассейне

Для расчета необходимых параметров побудительного расхода и скоростей  $V_T$ , требуется совместное решение следующих уравнений:

- свободной поверхности вращательного движения  $z = \frac{w^2 r^2}{2g}$ ;
- перехода потенциальной энергии в кинетическую  $V_{\Pi} = \varphi \sqrt{2g\Delta h}$ ;
- равенства количества движения побудительного и вращательного потоков;
- изменения параметров затопленной турбулентной струи;

где  $z = \Delta h$ , м – превышение ординаты свободной поверхности над центром вращения;

$r$ , м – радиус рассматриваемой точки;

$\varphi$  – коэффициент скорости, учитывающий потери на участке протекания;

$w = \frac{V_T}{r}$ , рад/с – угловая скорость вращения потока.

Совместное решение вышеприведенных уравнений при  $\varphi=0,9$  [1] показало, что  $V_{\Pi} = 0,9V_T$ , а  $V_d = \sqrt{V_{\Pi}^2 + V_T^2} = 1,345V_T$ . Для дальнейшего решения примем  $V_T = 0,5$  м/с. Тогда, по [1, табл.7.14] при глубине потока в бассейне  $h = 2$  м, допускаемый средний размер частиц составит 0,14 мм, т.е. частицы размером менее 0,14 мм будет находиться в потоке во взвешенном состоянии. При этом донная скорость у стенок бассейна составит  $V_d = 1,345$  м/с,  $V_T = 0,67$  м/с. Такая скорость (согласно [1, табл.7.14]) способна транспортировать по дну достаточно крупные влекаемые отложения со средним диаметром менее 15 мм. Для градиен блоков №3 и №4 РоАЭС перепад уровней между центром и периферией составит:

$$\Delta h = \frac{V_T^2}{2g\varphi^2} = 16 \text{ мм}.$$

Таким образом, даже при малых перепадах свободной поверхности между центром и периферией возникают достаточно высокие донные скорости  $V_d$  поперечной циркуляции (свыше 0,60 м/с), способные транспортировать влекаемые частицы размером более 10 мм [1];

Для оценки параметров побуждаемого потока из четырех подъемных шахт воспользуемся уравнением количества движения, в предположении, что энергия побуждаемого потока переходит в энергию вращательного движения, при минимуме потерь на трение и силового воздействия на шахты, т.е.

$$\begin{aligned} (KD)_{\text{поб}} &= (KD)_{\text{вращ}}; \\ (\rho QV)_{\text{поб}} &= (\rho QV)_{\text{вращ}} \text{ или} \\ (\rho SV^2)_{\text{поб}} &= (\rho SV^2)_{\text{вращ}}, \end{aligned}$$

где  $\rho$  – плотность потоков, кг/м<sup>3</sup>;

$Q, S, V$  – соответственно расходы, площади и средние скорости течения потоков.

Если параметры побуждаемого потока можно задать или рассчитать, то  $(KD)_{\text{вращ}}$  вращательного движения необходимо интегрировать, т.к. от центра к периферии тангенциальные скорости линейно изменяются от  $V_T = 0$  до  $V_T = wR$  и расчетное уравнение приобретает следующий вид:

$$(\rho QV)_{\text{поб}} = (\rho SV^2)_{\text{вращ}} = \int_0^R (\rho V_T 2 h R)_{\text{вращ}}, \quad (1)$$

где  $S$  – площади рассматриваемых сечений;

$R$  – внутренний радиус водосборного бассейна.

Параметры четырех побуждаемых потоков рассмотрим по схеме затопленного

истечения жидкости через малое отверстие (рис. 2а), т.к. напор над отверстием  $H$  составит около 10 м, а высоту отверстия назначим не болееа <1 м, т.е.  $\frac{a}{H} < 1$ [1]. Тогда скорость истечения из отверстия равна:

$$V_{\text{поб}} = \varphi\sqrt{2gH}, \tag{2}$$

а расход

$$Q_{\text{поб}} = S\mu\sqrt{2gH} = ab\mu\sqrt{2gH}, \tag{3}$$

где  $\varphi = 0,9$  – коэффициент скорости;

$\mu = 0,6$  – коэффициент расхода;

$a$  и  $b$  – искомые, соответственно, высота и ширина отверстий.

Количество движения вращательного потока в бассейне определим в предположении  $h = \text{const}$ , ввиду малого перепада между центром вращения и периферией:

$$\int_0^R (\rho SV^2)_{\text{вращ}} = \rho \int_0^R (hdrw^2 r^2)_{\text{вращ}} = w^2 h \int_0^R (r^2 dr)_{\text{вращ}} = \rho w^2 h \frac{R^3}{3}. \tag{4}$$

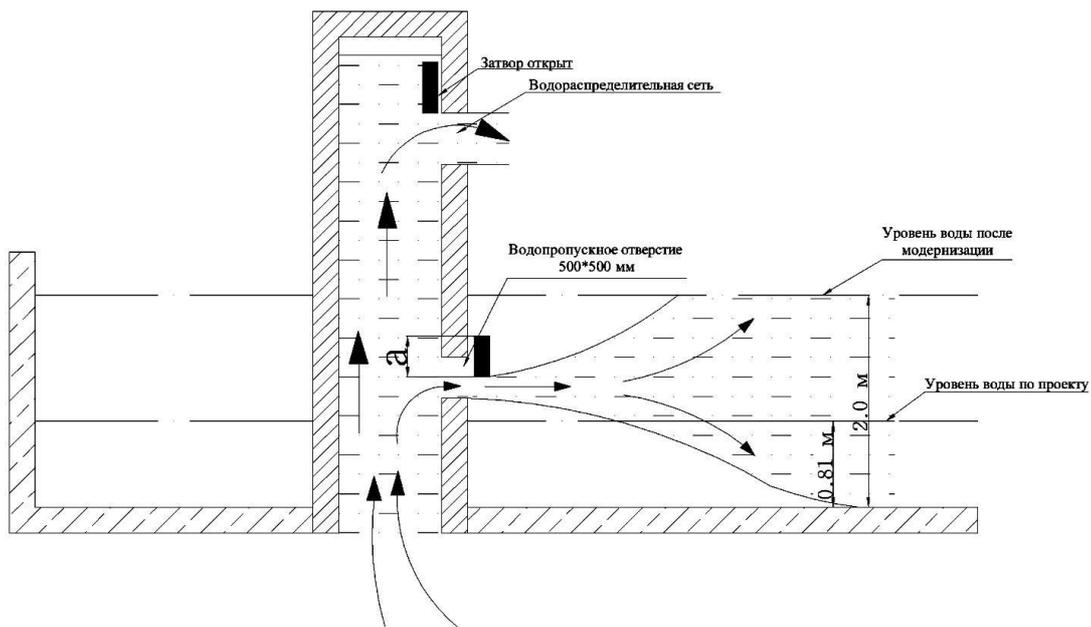


Рис. 2а. – Схема затопленного истечения побудительного расхода воды

Подставляя в уравнение (1) выражения (2), (3), (4), с учетом четырех побудительных расходов из диаметрально расположенных подъемных шахт, получим:

$$4\rho ab\mu\sqrt{2gH}\varphi\sqrt{2gH} = \rho w^2 h \frac{R^3}{3},$$

где угловая скорость вращения равна  $w = \frac{V_T}{R}$ .

Окончательно расчетная зависимость принимает следующий вид:

$$24\varphi ab\mu gH = V_T^2 hR.$$

Так, для условий РоАЭС, задавшись шириной и высотой затвора  $b * c = 0,5 * 0,5$  м, найдем требуемую величину открытия затвора, из-под которого пропускается побудительный расход  $Q$ :

$$a = V_T^2 h R / 24 \varphi b \mu g H = 0,5^2 * 2 * 67,6 / 24 * 0,9 * 0,5 * 0,6 * 9,81 * 10 \approx 0,06 \text{ м}$$

При этом скорость истечения потока из-под затвора составит:

$$V_{\text{поб}} = \varphi \sqrt{2gH} = 0,9 * \sqrt{2 * 9,81 * 10} = 12,6 \text{ м/с};$$

а величина побудительного расхода:

$$Q_{\text{поб}} = ab\mu\sqrt{2gH} = 0,06 * 0,5 * 0,6 * \sqrt{2 * 9,81 * 10} = 0,25 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Суммарный расход воды, забираемый из четырех подъемных шахт, равен  $1 \text{ м}^3/\text{с}$ , что не более 2% от всего расхода, поступающего на градирню для охлаждения в жаркий период. Максимальная пропускная способность четырех, полностью открытых затворов, при свободном истечении (рис. 2б) примерно составит:

$$Q_{\text{поб}} = 4cb\mu\sqrt{2gH} = 4 * 0,5 * 0,5 * 0,6 * \sqrt{2 * 9,81 * 15} = 10,3 \text{ м}^3/\text{с},$$

что соизмеримо с производительностью одного насоса ( $Q=12,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

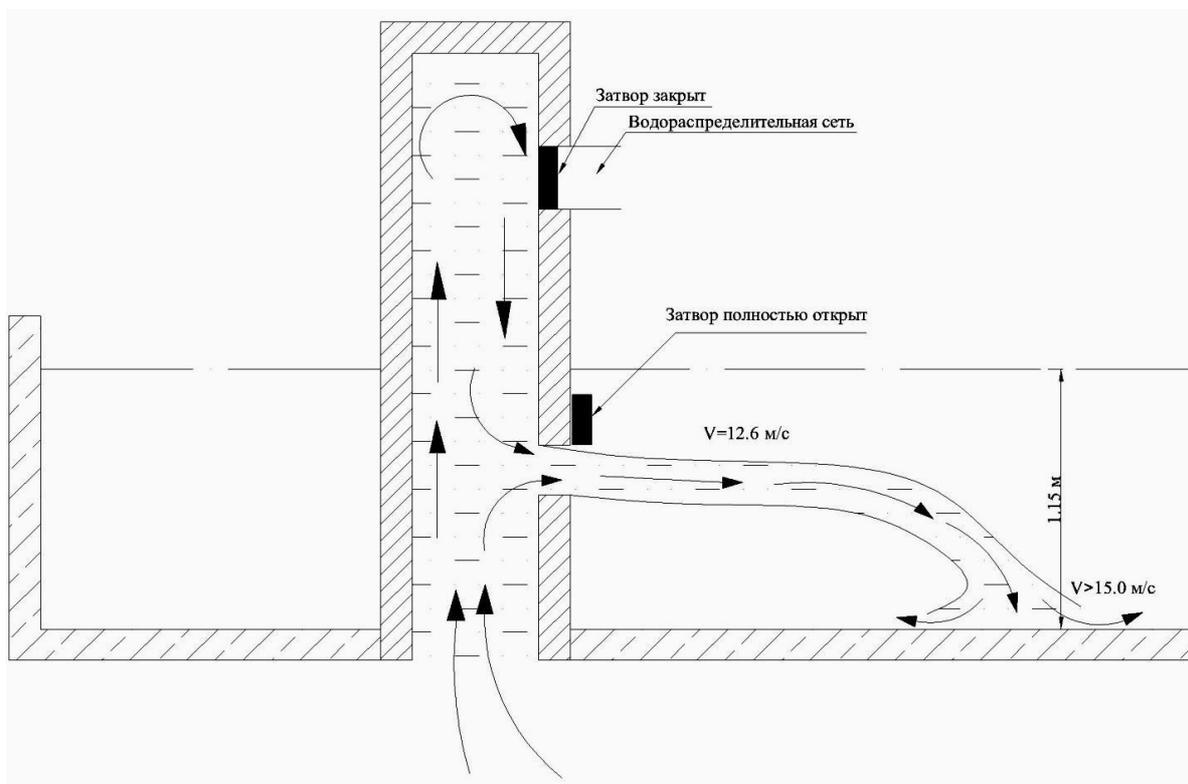


Рис. 2б. – Схема свободного истечения воды в начальный момент промывки

Внутренние размер шахты 2400\*2200 позволяют выполнить на одной из граней квадратное отверстие и смонтировать в нем управляемый простой плоский затвор размером 500 \*500, без особых требований к герметичности.

В связи с тем, что подъемные шахты расположены на расстоянии 6,7 м от стенок бассейна, а ось побудительного потока – на расстоянии более 8,0 м, рассчитаем кинематические характеристики побудительной струи в неподвижной среде (начальный этап включения) при достижении ею стенок бассейна (рис. 3а).

На основании решения уравнения изменения кинетической энергии вдоль плоской турбулентной затопленной струи Г.Н. Абрамовичем получена следующая зависимость [3]:

$$\frac{U_{max}}{U_0} = 1,2/\sqrt{kx/b_0 + 0,41},$$

- где  $U_{max}$  – скорость по оси потока на расстоянии  $x$  от выходного сечения;
- $U_0$  – скорость потока в выходном сечении;
- $k$  – коэффициент, характеризующий влияние турбулентности струи на степень ее расширения;
- $b_0$  – половина ширины или высоты выходного отверстия затвора, в зависимости от плоскости изучения расширения струи.

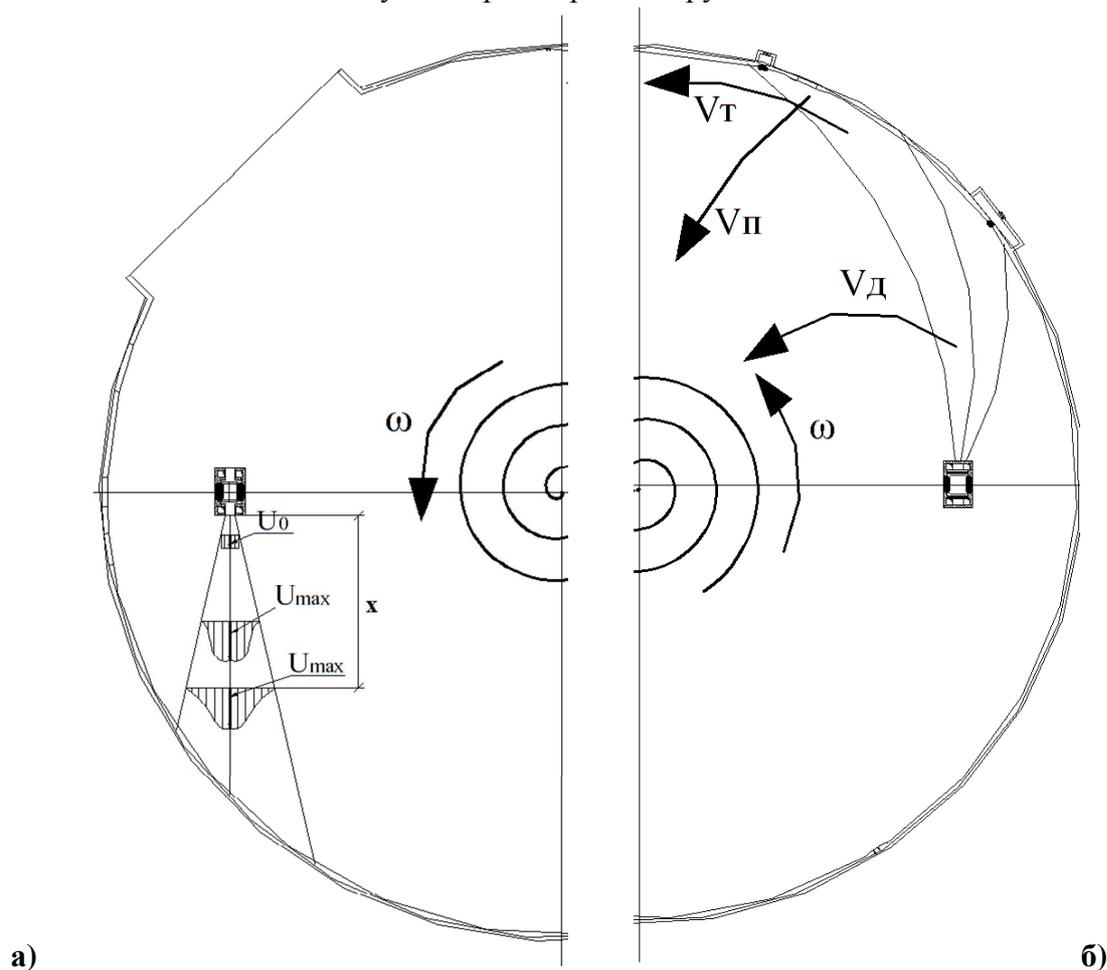


Рис. 3. – Турбулентные следы:  
а) в спокойном потоке; б) во вращающемся потоке

В рассматриваемом случае степень турбулентности будет очень высокой, т.к. через затвор пропускается безнапорный восходящий поток со свободной поверхностью, возвратными течениями и сжатием струи по всему периметру, поэтому в первом приближении примем  $k = 0,3$ . В вертикальной плоскости, из-за малой расчетной высоты отверстия  $a = 0,06$  м, произойдет очень быстрое затухание  $U_{\max}$  на коротком расстоянии, поэтому в качестве расчетной принимаем половину ширины затвора  $b_0 = 0,25$  м и рассматриваем плановое расширение струи.

Согласно проекту «Мостострой №6», расстояние от водопропускной грани затвора, по оси струи, до стенки бассейна равно  $x = 48$  м. Тогда скорость по оси у стенки составит:

$$U_{\max} = \frac{U^{0,1,2}}{\sqrt{kx/b_0 + 0,41}} = 12,6 * \frac{1,2}{\sqrt{0,3 * 48/0,25 + 0,41}} = 1,98 \text{ м/с}$$

Полученная скорость  $U_{\max}$  четырехкратно превышает требуемую тангенциальную  $V_T = 0,5$  м/с.

Все представленные расчеты по преобразованию количества движения, параметров плоской турбулентной затопленной струи выполнены по простым расчетным схемам и не учитывают влияние попутного вращательного потока, потерь на трение при вращении всей массы воды (около 30000 т) в бассейне, а так же целый ряд факторов. С целью оптимизации основных параметров предложенного метода требуются более глубокие теоретические изыскания, проведение лабораторных модельных гидравлических исследований с учетом всех факторов, что планируется выполнить в ближайшее время.

Предлагаемый режим вращательного движения рекомендуется применять при условиях нормальной эксплуатации, в прохладные и холодные времена года, когда не требуется высокая интенсивность охлаждения и часть секторов орошения отключена. В это время большую часть оборотного расхода воды можно использовать в качестве побудительного, обеспечивающего вращение потока и очистку дна.

Наибольший эффект промывки, очистки дна бассейна и сбора мусора в центре вращения может быть получен во время останова блока. Вода из бассейна откачивается, все зоны орошения отключаются, полностью открываются затворы для сброса побудительного расхода, перекрывается входной участок отводящего канала и переливные окна. Один из 4-х рабочих насосов включается на полную мощность ( $Q=12,5$  м<sup>3</sup>/с) на 30-40 минут, до полного заполнения бассейна. В начальный момент свободного истечения, при малой глубине воды в бассейне (рис. 3б), высокоскоростной поток (свыше 14 м/с) выполнит основную размывающую работу. После остановки насоса, вращение будет медленно останавливаться, а все размывные и взвешенные отложения за счет поперечной циркуляционной придонной скорости будут перемещены ближе к центру вращения.

По дну бассейна установлено большое количество опорных стоек, колонн и рам, которые частично будут препятствовать вращательному движению. Однако их суммарная площадь составляет не более 1% от площади дна всего бассейна. При этом за каждой стойкой и препятствием, в гидравлической тени, так же будут скапливаться отложения. Уборка и утилизация отложений после такой промывки будет значительно упрощена по сравнению с ситуацией, когда эти отложения были бы равномерно распределены по всей площади водосборного бассейна и на дне приемной аванкамеры ОНС.

Вышеизложенные расчеты свидетельствуют о принципиальной возможности создания вращательного движения воды в водосборных бассейнах башенных

испарительных градирен с целью повышения эффективности их эксплуатации, при минимальных затратах на модернизацию, пересмотра и дополнения некоторых положений типовых методик расчета.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по гидравлике [Текст] / Под ред. В.А. Большакова. 2-е изд., перераб. и доп. – Киев.: Вища шк. головное изд.-во, 1984. – 343 с.
2. Экологический вестник Дона. «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2013 году» [Текст]. – Ростов-на-Дону: Администрация Ростовской области, 2013. – 291 с.
3. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика [Текст] / Д.В. Штеренлихт: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с., илл.

### REFERENCES

- [1] Spravochnik po gidravlike [Reference book on hydraulics]. Pod red. V.A. Bol'shakova. 2-e izd., pererab. i dop. [Edited by V.A. Bolshakova, 2nd edit., reslave and additional ] Kiev. Pub. Vishhashk. golovnoe izd.-vo [The higher school. Head publishing house], 1984, 343 p. (in Russian)
- [2] Ekhologicheskij vestnik Dona. «O sostojanii okruzhajushhejj sredy i prirodnykh resursov Rostovskojj oblasti v 2013 godu» [Ecological bulletin of Don. "About a state of environment and natural resources of the Rostov region in 2013"]. Rostov-in-Don, Pub. Administracija Rostovskojj oblasti [Administration of the Rostov region], 2013, 291 p. (in Russian)
- [3] Shterenlikht D.V. Gidravlika [Hydraulics]. Uchebnik dlja vuzov [The textbook for higher education institution] M. Pub. Ehnergoatomizdat [Energoatom Publishing House], 1984, 640 p. (in Russian)

### Improving of Efficiency of Cleaning up Watersheds Basins of Cooling Vaporizing Towers

**O.L. Kolchenko \*, I.A. Nagibina\*, Ju.M. Matevosjan\*,  
G.V. Domrina\*\*, I.P. Tjumenev\*\*\***

\* *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

\*\* *Novocherkassk Engineering and Meliorative Institute, Don State Agricultural University,  
111, Pushkinskaya, Novocherkassk, Rostov region, 346428*

\*\*\* *Rostov NPP the branch of JSC Rosenergoatom Concern,  
Volgodonsk-28, Rostov region, Russia 347340*

**Abstract** - Theoretical justification of not power-intensive mode of creation of a rotary motion is given in watersheds basins of modern cooling vaporizing towers for the purpose of prevention of carrying out of the solid soiling particles out of borders of the pool and their automatic collecting is given. It will allow to minimize costs of cleaning, considerably to lower load of the rotating grids and filters. The mode of creation of such movement and a way of modernization of design decisions is described.

*Keywords:* water, speed, expense, stream, spray, rotary motion, watersheds basin, cooling towers.