

УДК 621.039:532:533.6

УПРАВЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕНЬЮ НАД БРЫЗГАЛЬНЫМИ БАССЕЙНАМИ АЭС. ГИДРОАЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2014 г. В.Г. Бекетов, О.Л. Кольченко, Г.В. Домрина, Ю.М. Матевосян

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

В статье изложены результаты предварительных исследований простой конструкции плоской решетки, с помощью которой возможно управление скоростной структуры воздушного потока над брызгальными бассейнами АЭС. Рассмотрены вопросы гидроаэродинамического моделирования. Применение конструкции позволит значительно снизить непроизводительные потери воды.

Ключевые слова: воздушный поток, брызгальные бассейны, решетка, гидроаэродинамическое моделирование, аэродинамическая тень, водобойная стенка.

Поступила в редакцию 04.08.2014 г.

При работе многих агрегатов АЭС необходимо отводить в окружающую среду большое количество теплоты. В качестве промежуточной охлаждающей среды для оборудования и помещений главного корпуса используют техническую воду, которую затем охлаждают вне главного корпуса. Для работы АЭС техническое водоснабжение имеет немаловажное значение, во многом определяя надежность и экономичность ее работы. Капиталовложения в систему технического водоснабжения составляют 5-10% (в отдельных случаях и более) от общей стоимости установленного киловатта. Поэтому необходимо уделять большое внимание при обосновании и выборе проектных решений для системы технического водоснабжения.

На Ростовской АЭС для системы охлаждения ответственных потребителей используются брызгальные бассейны (ББ), которые очень эффективны с точки зрения испарительного охлаждения. От потребителей реакторного отделения техническая вода отводится для охлаждения в брызгальные бассейны. Выбор в качестве охладителей был обусловлен требованиями к обеспечению повышенной надежности эксплуатации системы с учетом внешних воздействий. Охлаждение технической воды в брызгальных бассейнах осуществляется путем разбрызгивания ее с помощью сопел.

Охлажденная в брызгальных бассейнах техническая вода по трубопроводу самотеком подводится к водоприемным камерам насосных станций, расположенных в здании РДС, проходит через вращающиеся водоочистные сетки, и далее от насосов вода по трубопроводу с расходом не менее 3000 м³/ч подается в реакторное отделение на его потребители и с расходом около 600 м³/ч на потребители РДС. Брызгальные бассейны имеют огромный недостаток – большие непроизводительные потери воды. Так, при работе блока №1 и №2 Ростовской АЭС, из 38,78 млн. м³/год забираемых из Цимлянского водохранилища, 1,22 млн м³/год уходит на подпитку брызгальных бассейнов, из которых 525 тыс. м³ продуктивно расходуется на дополнительное испарение, а 690 тыс. м³ безвозвратно уносится ветром. Учитывая значительную стоимость 1 м³ технической воды (около 70 руб/м³) экономические потери оказываются очень высокими. В связи с этим, для снижения потерь, предлагается использовать простую конструкцию решетки, состоящей из продольных рабочих

элементов, аналогом которой является полупропускная лесозащитная полоса, а прототипом – конструкция прорезной водобойной стенки.

Обе конструкции выполняют схожие защитные функции:

а) Лесополоса – защитные лесные насаждения в виде рядов деревьев и кустарников, создаваемые среди пахотных земель, на пастбищах, в садах, вдоль оросительных и судоходных каналов, железных и автомобильных дорог. Лесополоса защищает приземную часть от сноса (эрозии) плодородного слоя, а также для защиты железных и автомобильных дорог от снежных и песчаных заносов высокоскоростными порывами ветра. С наветренной стороны происходит торможение воздуха до $V=(0,3\div 0,5) V_0$ и разгон верхних (над лесополосой) слоев среды. С подветренной стороны образуется возвратное вихревое течение с последующим плавным восстановлением исходной скоростной структуры. Защитный эффект лесополосы (зона со скоростями $V \leq 0,4V_0$) оценивается в $5H$ – с наветренной и $20H$ с подветренной сторон. То есть при высоте лесонасаждений $H=10\div 12$ м защитная зона составляет $250\div 300$ м.[1].

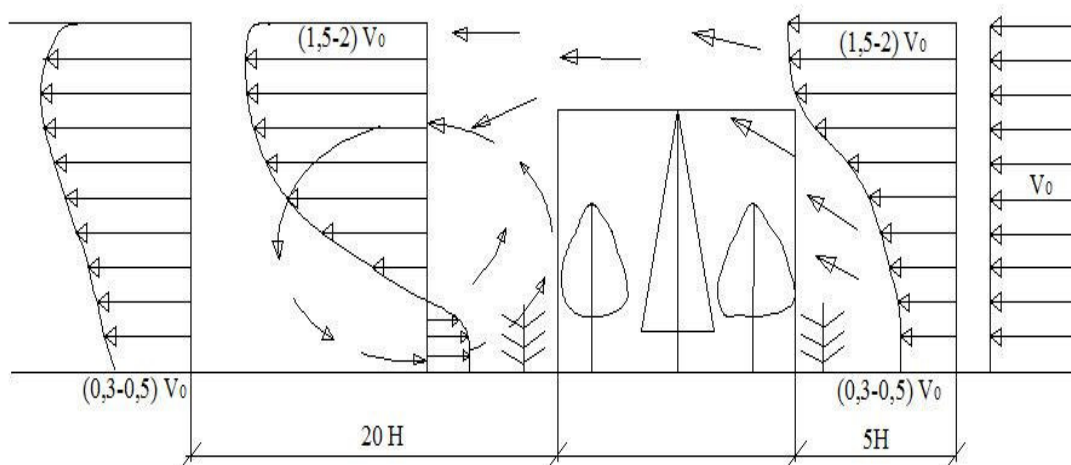


Рис. 2.1 – Лесозащитная полоса и деформация эпюры скорости за ней

б) Прорезная водобойная стенка устраивается в нижних бьефах гидротехнических водосбросных и водопропускных сооружений и предназначена для защиты дна отводящего русла от избыточной кинетической энергии потока. Стенка позволяет на коротком участке перевести поток из бурного состояния в спокойное, снизить скорости и предотвратить размыв дна отводящего русла. Стенка как преграда тормозит нижние слои и ускоряет верхние. Ее затопленные вертикальные элементы расщепляют единый высокоскоростной поток на множество мелких, которые за стеной соударяются, перемешиваются и теряют исходную энергию.

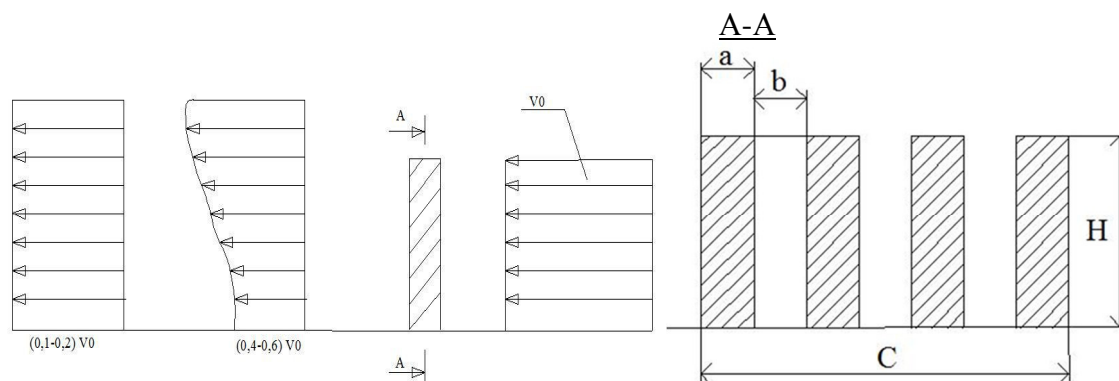


Рис. 2.2. – Прорезная водобойная стенка

Безусловно, самым эффективным способом защиты испарившейся над брызгальными бассейнами воды от сноса ветром, было бы устройство лесонасаждений по всему периметру бассейна. Однако, это идет в разрез требованиям мер по физической безопасности АЭС, что требует дополнительных мероприятий и затрат по защите и очистке ББ от опадающей в осенний период листвы. При этом срок ожидания эффективности (рост лесополосы) составит 5÷8 лет.

Конструкция прорезной водобойной стенки оказалась очень эффективной и вошла в «Каталог типовых сборных железобетонных конструкций для водохозяйственного строительства».

Однако многолетняя эксплуатация и натурные обследования показали ряд ее недостатков:

1) Высокие динамические нагрузки, так как элементы стенки расположены вертикально, то есть нормально к оси высокоскоростного потока и воспринимают максимум нагрузок.

2) Из первого недостатка вытекает и высокий абразивный износ от воздействия вездесущего потока.

3) Частичная забивка элементов стенки плавающим мусором приводит к резкому снижению эффективности работы.

В связи с этим было решено усовершенствовать конструкцию прорезной стенки (установить элементы стенок под углом к потоку), провести ее предварительные исследования и оценить возможность использования полученных результатов, как в водной, так и в воздушной среде.

На первом этапе были выполнены Предварительные гидравлические исследования формирующих характеристик решеток в условиях одномерной (плоской) задачи в горизонтальном прямоугольном стеклянном (0,25x0,50м) лотке с длинной рабочей части 8м.

Изучению трансформирующего воздействия на поток были подвергнуты различные типы решеток. Установлено, что основными факторами, влияющими на формирующее воздействие решетки, является:

– скважность решетки $\Omega = F_{эл}/F_C$; где $F_{эл}$ – суммарная площадь элементов решетки; F_C – площадь всего сечения или $\Omega = a/a+b$ (рис. 2)

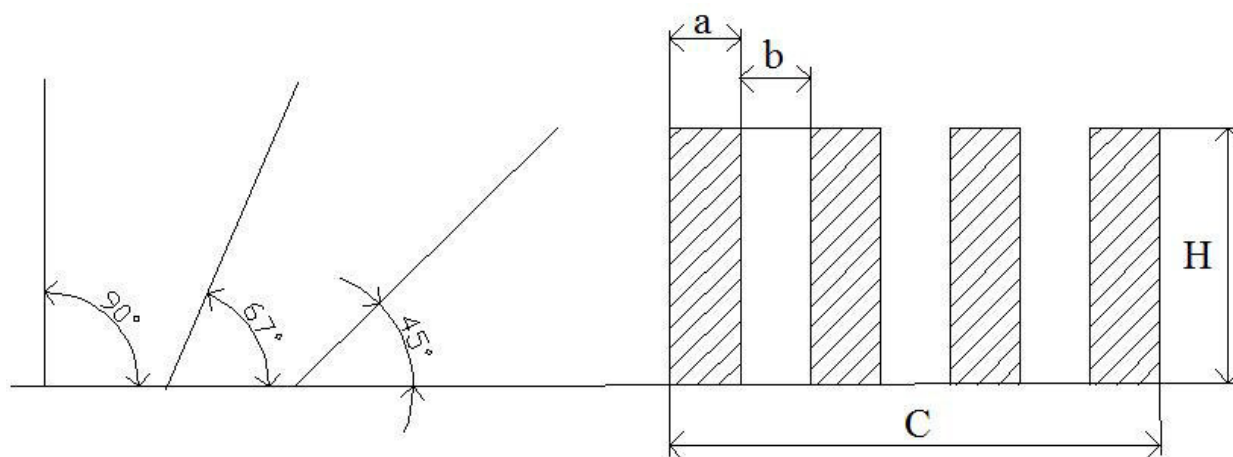


Рис. 3. – Геометрические характеристики решетки

параметр частоты установки решетки $f = c/a+b$

где c – фиксированный единичный размер габаритной ширины решетки (ширина лотка);

- a – ширина рабочего элемента;
 b – ширина зазора между элементами;
 α – угол установки решетки относительно оси потока (дна);
 V – средняя скорость потока перед решеткой.

Скважность Ω изменялась в пределах (30÷70)%, частота f от 12 до 3; угол α от 45° до 90°. Во всех опытах, независимо от угла α рабочая высота решетки устанавливалась равной $H = 15$ см, а глубина подтопления $H_{\text{П}} = 25$ см. Скорости потока по глубине измерялись в шести точках: $V_{\text{пов}}$; $V_{0,2H}$; $V_{0,4H}$; $V_{0,6H}$; $V_{0,8H}$; $V_{\text{дна}}$; в створах на расстоянии равном H от верхнего края решетки.

В настоящей работе рассматриваются результаты исследований, полученные на гидравлической модели, поэтому рассмотрим возможность их применения к аэродинамике.

Точное описание многих аэродинамических явлений сопряжено со значительными математическими трудностями из-за сложности процессов и учета всех факторов, влияющих на них. В таких случаях прибегают к экспериментальным исследованиям на моделях реальных объектов. При этом необходимо четко понимать физическую картину изучаемого явления и правильно определять безразмерные параметры подобия.

Явления механически подобны, если они подобны геометрически, кинематически и динамически; то есть $t_H/t_M = \text{const}$; $t_H/t_M = \text{const}$; $u_H/u_M = \text{const}$;

$$F_H/F_M = \text{const}$$

- где l – длина,
 t – время;
 u – скорость;
 F – сила в подобных точках модели и объекта;
 индексы (н и м) – натура и модель.

Полному гидродинамическому подобию отвечает критерий Ньютона:

$$\frac{F_H}{\rho_H \cdot l_H^2 \cdot U_H^2} = \frac{F_M}{\rho_M \cdot l_M^2 \cdot U_M^2} = \text{idem} \quad (1)$$

Полное гидродинамическое подобие возможно только при соблюдении очень многих безразмерных критериев, вытекающих из критерия Ньютона:

- 1) $\frac{U^2}{gl} = Fr = \text{idem}$ – критерий Фруда, где U – масштаб скорости, g – ускорение;
- 2) $\frac{P}{\rho U^2} = Fu = \text{idem}$ – критерий Эйлера, где P – плотность;
- 3) $\frac{Ul}{\nu} = Re = \text{idem}$ – критерий Рейнольдса, где ν – вязкость;
- 4) $\frac{l}{Ut} = Sh = \text{idem}$ – критерий Струхала, где l – диаметр, t – время процесса.

Однако выполнить полное моделирование невозможно. В этих случаях прибегают к частичному моделированию, когда модель исследуется лишь по основным признакам при преобладающем действии тех или иных сил, например: тяжести, инерции, вязкости, трения, давления и т.д.

Во многих случаях основными критериями при моделировании являются критерии Фруда и Рейнольдса т.к. учитывают взаимосвязь сразу трех основных сил: инерции с силами тяжести и трения (вязкости):

$$Re = \frac{U_H \cdot l_H}{V_H} = \frac{U_M \cdot l_M}{V_M} = idem; \quad (2)$$

$$Fr = \frac{U_H^2}{gl_H} = \frac{U_M^2}{gl_M} = idem \quad (3)$$

Однако, полное гидромеханическое подобие никогда не выполнится, т.к. два определяющих критерия Re и Fr на практике несовместимы.

Определим масштабы скорости:

$$m_u = \frac{U_H}{U_M} \quad (4)$$

Исходя из этих критериев. При $Re_M = Re_H$ и одинаковой жидкости $V_H = V_M = V$

$$\frac{U_H \cdot l_H}{V} = \frac{U_M \cdot l_M}{V} \rightarrow \frac{U_H}{U_M} = \frac{l_M}{l_H} \quad (5)$$

Т.е. при уменьшении линейного масштаба скорость на модели во столько же раз нужно увеличить. При моделировании по Фруду:

$$\frac{U_H^2}{l_H} = \frac{U_M^2}{l_M} \rightarrow \frac{U_H}{U_M} = \sqrt{\frac{l_H}{l_M}} \quad (6)$$

Скорость должна быть уменьшена. В нашем случае если приводить моделирование по Re на воздушной модели, при скорости ветра в натуре:

$$U_H = 5 \text{ м/с и масштабе } me = \frac{l_H}{l_M} \cong 20 \quad U_M = U_H \frac{l_H}{l_M} = 5 \cdot 20 = 100 \text{ м/с}$$

что реально выполнить сложно, а при скорости свыше 70 м/с воздух сжимаем, возникают скачки уплотнения и действуют иные законы термогазодинамики.

Критерием Рейнольдса оценивается качественно характер явления, какие силы преобладают (инерции или трения), при каком режиме происходит процесс (ламинарный или турбулентный). То есть существуют условия движения, независимые от Re , автомодельны по отношению к нему. Иначе говоря, силы вязкости по сравнению с силами инерции не оказывают существенного влияния на механизм явления. $Re_{кр} = 2300$ – критерий перехода от ламинарного движения к турбулентному. При $Re > 4000 \div 5000$ – зона квадратичного турбулентного движения.

Таким образом, область автомодельности определяется по Re , а линейный масштаб моделирования по Fr .

В качестве линейного размера l примем вертикальную проекцию решетки H , т.к. практический интерес представляет краевой эффект обтекания верхней кромки элемента и образование водоворотной зоны. Определим число Re , при котором происходило турбулентное обтекание элемента:

$$Re_M = \frac{U_M \cdot H_M}{V_M} \geq 5000 \quad (7)$$

V_M – вязкость воды при 20°C, $V_M = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;

$U_M = 0,2 \text{ м/с}$ – минимальная скорость на модели;

$$Re_M = \frac{0,2 \cdot 0,15}{10^{-6}} = 30000 \gg 5000 \text{ Турбулентное обтекание.}$$

При протекании потока между элементами:

$$Re_M = \frac{0,2 \cdot 0,01}{10^{-6}} = 2000 < 5000 \text{ – ламинарный;}$$

$a=0,01$ минимальное расстояние между элементами решетки.

При $V = 0,5 \text{ м/с}$ $Re=5000$ турбулентный,

$V = 0,8 \text{ м/с}$ $Re=8000$ турбулентный.

Т.е. для анализа принимаются опыты со скоростями $U \geq 0,5 \text{ м/с}$

Из критерия Фруда определяем масштаб модели:

$$me = \frac{l_H}{l_M} = \frac{U_H^2}{U_M^2} = \frac{4,5^2}{0,8^2} \approx 30 \quad (8)$$

где U_H – среднегодовая скорость (из ОВОС).

Таким образом, за решеткой с размерами в 30 раз больше модельных и скоростях выше $U_H \geq 4,5 \text{ м/с}$ в натуре, при воздушном потоке, будет наблюдаться явление, подобное, полученному на гидравлической модели. [2].

Для принятия решения по размерам решетки были проанализированы следующие факторы:

1) Сквозность. Рассматривались опыты со сквозностью 50% (по аналогии с полупропускной лесополосой). При меньшей сквозности и малых скоростях будет затруднен доступ свежего воздуха к брызгальным бассейнам, над поверхностью которых происходит тепло-массообмен испарительного охлаждения. При большей сквозности за решетками не было отмечено возникновение водоворотной зоны, т.е. эффекта «перевернутой эпюры».

2) Частота установки. Рассматривались результаты с максимальной частотой установки $f=c/a+b$ элементов. В опытах исследовались элементы решетки, изготовленные из деревянных планок, шириной 1; 1,5; 3 см, где $c=25$ см ширина лотка:

$$f = \frac{25}{1+1} \cong 12; \quad f = \frac{25}{1,5+1,5} \cong 8; \quad f = \frac{25}{3+3} \cong 4;$$

За решеткой с высокой частотой элементов происходило быстрое затухание пульсаций скорости, что в натуре соответствует сглаживанию порывов ветра. За редкой решеткой отсутствовал эффект «перевернутой эпюры».

3) Угол установки. Опыты с углом установки элементов $\alpha=90^\circ$ были отброшены, т.к. независимо от частоты f , сквозности Ω и скорости V_0 водоворотной зоны не наблюдалось.

4) Скорость потока. Практический интерес представляли опыты с повышенными скоростями $V_0 \geq 0,5 \text{ м/с}$, т.к. при пересчете в натуре давало среднюю V_H воздуха $\geq 4,0 \text{ м/с}$.

Анализируя предварительные опыты можно отметить положительный эффект при обтекании конструкции и сделать следующие выводы:

1) При установке решетки под углом 90° к потоку, в исследованном диапазоне

скважности, частоты элементов и скоростей водоворотной зоны за ними не наблюдалось.

2) При установке решетки под углом $67,5^\circ$ водоворот образовывался только при высокой частоте установке элементов $f = 12$ и скоростях $V = 0.5$ м/с.

3) При угле установки решетки в 45° водоворотная зона всегда образовывалась во всем диапазоне скоростей и частоте установки элементов $f = 12$ и $f = 8$.

4) Минимальный размер водоворотной зоны (горизонтальная проекция) был зафиксирован равным $5H$, что соответствовало предельному углу естественного расширения потока.

5) С увеличением скорости размеры водоворотной зоны возрастают.

6) С физической точки зрения образование гидравлической и аэродинамической тени можно объяснить не только срывом турбулентного пограничного слоя при краевом обтекании плоских элементов решетки, но и эффектом «запирания» зазора между элементами встречными обтекающими потоками. Возникающая «подушка» препятствует свободному проникновению потока между элементами решетки.

На следующем этапе будут выполнены подробные исследования с использованием методов последовательного планирования эксперимента и реализации плана Хартли Н5. Полученные полиномиальные модели будут исследованы на локальные минимумы и максимумы и приняты решения по оптимальным размерам конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пойкер, Х.* Культурный ландшафт: формирование и уход [Текст] / Х. Пойкер; пер. с нем. В.В. Цветкова. – М.: Агропромиздат, 1987. – С. 176.
2. *Смыслов, В.В.* Гидравлика и аэродинамика [Текст]: Учебник для вузов. – Пер. с укр., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1979. – С. 322–328.

Control of the Aerodynamic Shadow over Sprinkling Pools of the NPP. Hydroaerodynamic Modeling

V.G. Bekhetov, O.L. Kolchenko, G.V. Domrima, Yu.M. Matevosjan

*Volgodonsk Engineering Technical Institute
the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360 e-mail:
VITkafTEO@mephi.ru*

Abstract – The results of preliminary researches of a simple design of a flat lattice by means of which you can control the high-speed structure of an air stream over the sprinkling pools of the NPP are stated in the article. Problems of hydroaerodynamic modeling are considered. Application of a design will allow to reduce unproductive losses of water considerably.

Keywords: air stream, sprinkling pools, lattice, hydroaerodynamic modeling, aerodynamic shadow, fountain wall.

REFERENCES

- [1] *Pojker H.* Kulturnyj landshaft: formirovanie i uhod [Cultural landscape: formation and leaving] / H. Pojker; per. s nem. V.V.Cvetkova [translated from German by V. V. Tsvetkov]. M. Pub. Agropromizdat [Agropromizdat], 1987. 176 p. (in Russian)
- [2] *Smyslov V.V.* Gidravlika i ajerodinamika [Hydraulics and aerodynamics] : Uchebnik dlja vuzov [The textbook for higher education]. Per. s ukr., pererab. i dop [translation from Ukrainian, processed and added]. Kiev. Pub. Vishha shkola [The higher school], 1979. pp. 322–328. (in Russian)