

УДК 532.5

**В.А. ВОСКОБОЙНИК, В.В. ХОМИЦКИЙ, А.А. ВОСКОБОЙНИК,
А.В. ВОСКОБОЙНИК, Л.Н. ТЕРЕЩЕНКО, И.А. ХИЖА**

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ГИБКОЙ СТРУЕНАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЗАВЕСЫ

***Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований поля давления, действующего на полотно гибкой завесы модели струенаправляющего сооружения, спроектированного для акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя Южно-Украинской АЭС. Наибольшее динамическое давление, действующее на полотно завесы, наблюдается в приповерхностном слое потока. В спектральных плотностях мощности пульсаций пристеночного давления обнаружены дискретные составляющие, которые отвечают частотам колебания полотна завесы, их субгармоникам и гармоникам высших порядков.*

***Ключевые слова:** струенаправляющее сооружение, гибкая завеса, поле давления, спектр пульсаций давления.*

Введение

В настоящее время выработка электроэнергии в Украине и в большинстве стран Европы осуществляется в основном на крупных тепловых и атомных электростанциях (ТЭС и АЭС). Атомные электростанции, на долю которых приходится около 50% электроэнергии, вырабатываемой электростанциями Украины, играют ведущую роль в энергообеспечении народнохозяйственного комплекса [1]. Одним из важнейших условий надежной эксплуатации АЭС является их бесперебойное водообеспечение, источником которого являются водохранилища и водоемы-охладители. Системами охлаждения для нормального функционирования ТЭС и АЭС необходимо отводить в окружающую среду огромное количество тепла, составляющего около 70% энергии потребляемого топлива [2].

Среди основных гидрологических факторов, которые определяют условия функционирования водоемов-охладителей, важное место занимают водообмен, внутриводоемная гидродинамика и тепловой (термический) режим водных масс. Водообмен водоемов-охладителей подразделяют на две принципиально различные составляющие. Первая – внешний водообмен – формируется преимущественно за счет расхода воды на испарение и фильтрацию, с одной стороны, и компенсацию этих расходов благодаря подпитке с прилегающего природного водного объекта (реки, водохранилища), с другой. Внешняя подпитка, например, водоема-охладителя Южно-Украинской АЭС составляет в год 42% его объема [3]. Вторая составляющая – внутренний водообмен – обусловлен сбросом подогретых на станции вод и забором воды для охлаждения агрегата. На Южно-Украинской АЭС, например, такой водообмен осуществляется свыше 60 раз за год [3].

Эффективность охлаждения воды в водоеме-охладителе, а следовательно, и его гидротермический режим зависят напрямую от схемы организации движения потока, которая должна обеспечивать наиболее низкие температуры

охлажденной воды при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах [4]. Как показано в работе [5], компонентная схема водозборных и водовыпускных сооружений Ташлыкского водоема-охладителя Южно-Украинской АЭС относится к так называемому совместному типу, когда разделение потоков происходит за счет вертикальной стратификации температуры. Недостатком такой схемы является привлечение теплых вод верхнего слоя потока в нижние его слои. Для уменьшения этого эффекта в работе [6] предложено применить струенаправляющую завесу, которая способна разделить теплые воды, сбрасываемые в водоем, от вод нижнего слоя водоема, которые попадают в водозборные сооружения. Это дает возможность разделить поток не только по вертикали, но и по горизонтали. Как показали расчеты [7], струенаправляющее сооружение, которое достигает дна водохранилища, разделяет потоки воды на водосбросе и водозборе, улучшая, таким образом, тепловой режим работы Ташлыкского водохранилища-охладителя. При этом разница температур на водосбросе и водозборе достигает нескольких градусов. Проведенные технико-экономические расчеты [7] показывают, что реализация проекта системы доохлаждения эквивалентна вводу энергоблока тепловой станции мощностью до 100 МВт. Реконструкция системы технического водоснабжения Южно-Украинской АЭС позволит полностью исключить разгрузки энергоблоков в летний период из-за недостаточной охлаждающей способности водохранилища. А это значит, что дополнительные потери выработки электроэнергии будут сведены к минимуму.

Согласно проектно-конструкторской документации [8] струенаправляющее сооружение (завеса) (рис. 1) будет располагаться на расстоянии (80...140) м от восточной части Ташлыкского водохранилища-охладителя.

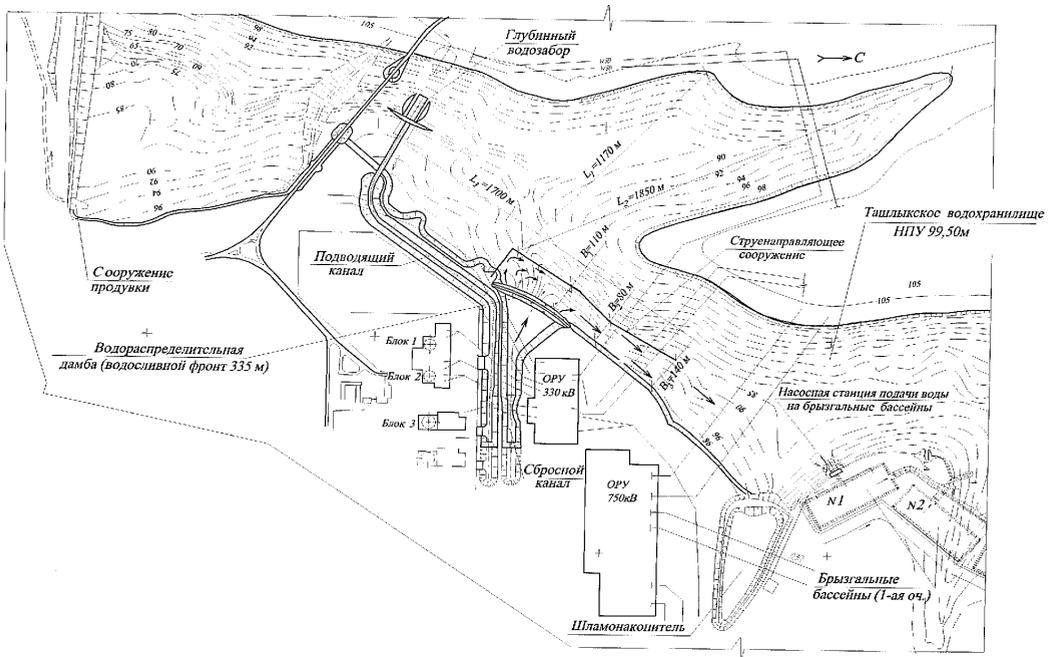


Рис. 1 – План-схема размещения струенаправляющего сооружения в акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя Южно-Украинской АЭС

Глубины в месте расположения завесы изменяются в зависимости от рельефа дна от 1 м до 15,2 м. Средние глубины в огражденной части равняются (4,4...10,4) м. Расстояние от струенаправляющего сооружения до противоположного берега водохранилища составляют (1170...1700) м. Вертикальная завеса выполняется на всю глубину потока до дна водохранилища. Глубина потока по длине сооружений в зависимости от рельефа дна изменяется от 1 м до 15,2 м [8].

Конструктивно струенаправляющее сооружение представляет собой гибкую платформу из пластиковых модульных элементов (понтон) системы "Sunplast", соединенных между собой специальными крепежными устройствами. К модульной плавучей платформе крепится сплошная вертикальная завеса, выполненная из армированной мембраны типа "Aqua100P" производства фирмы "Haugenplast" (Израиль).

В настоящее время Ташлыкское водохранилище работает в тяжелых условиях термического режима. В жаркие летние месяцы его охлаждающая способность снижается. Необходимого объема воды нужной температуры недостаточно для работы всех трех энергоблоков станции, поэтому в летний период возникает необходимость уменьшения эксплуатационной мощности Южно-Украинской АЭС [3]. Использование гибкой завесы в струенаправляющем сооружении в акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя, на которую натекает теплый поток из водосбросного канала, предусматривает изменить направление этого потока. При этом на завесу, которая достигает дна водоема, действуют нестационарные пристеночные и придонные течения, которые вызывают выгибание завесы и ее колебание. В угловых областях завесы генерируются крупномасштабные вихревые течения и напорные потоки, которые приводят к появлению нестационарных во времени и неоднородных в пространстве сил [9]. Они действуют как на завесу, так и на якорную систему, которая удерживает ее. Для определения этих сил, процессов и механизмов, которые их генерируют, а также для получения качественных и количественных характеристик структуры течения, напряженно-деформированного состояния полотна завесы и динамических нагрузок на якорную систему модели струенаправляющего сооружения возникла необходимость в проведении численных и экспериментальных научно-исследовательских работ.

Выполнение работ, результаты которых представлены, проведено методами физического эксперимента [9, 10]. Физическое моделирование реализовано в лабораторных условиях. Для измерения турбулентных параметров скорости и давления использовался экспериментальный стенд на базе специально разработанного и изготовленного гидродинамического канала Института гидромеханики НАН Украины. Стенд был оснащен датчиками скорости и давления, контрольно-измерительной аппаратурой и средствами анализа и регистрации данных. Совместно с инструментальными измерениями проведена визуализация потока с помощью красителей и подачи в поток контрастных веществ и частиц. В системах обработки и анализа экспериментальных данных использованы методы теории вероятности и математической статистики, с применением пространственно-временного корреляционного и спектрального анализ.

Цель исследований – определение поля давления, действующего на полотно гибкой завесы модели струенаправляющего сооружения, спроектированного для акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя Южно-Украинской АЭС.

Экспериментальный стенд

Для проведения физического моделирования и исследований напряженно-деформационного состояния гибкой завесы и динамических нагрузок на якорную систему модели струенаправляющего сооружения в акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя Южно-Украинской АЭС были разработаны и изготовлены экспериментальные установки и стенды. В них наряду со средствами измерений и контроля характеристик турбулентных течений использовались системы регистрации, обработки и анализа результатов исследований, детально описанные в работе [9, 10].

Основой экспериментального стенда служил гидродинамический канал, специально спроектированный и изготовленный согласно конструкторской документации, входная часть которого показана на рис. 2. Вода через струенаправляющие решетки поступала на модель дамбы и далее на гибкую струенаправляющую завесу, которая поддерживалась в вертикальном положении пенопластовыми поплавками и якорной системой, закрепленной на модели рельефа дна водохранилища. Номера створов, где располагались якоря вблизи модели струенаправляющей завесы, и поле скорости в приповерхностном слое, обтекающем завесу, представленное в работе [9], схематически показаны на рис. 3. В ходе исследований глубина потока над моделью дамбы (H) сохранялась как 0,06 м, а среднерасходная скорость течения (U) изменялась от 0,06 м/с до 0,21 м/с, которым отвечают числа Фруда $Fr = U / \sqrt{gH}$ от 0,08 до 0,27 и числа Рейнольдса $Re_H = UH / \nu$ от 3600 до 12600, где g – гравитационная постоянная и ν – кинематический коэффициент вязкости воды.



Рис. 2 – Входной участок гидродинамического канала с моделью струенаправляющей завесы

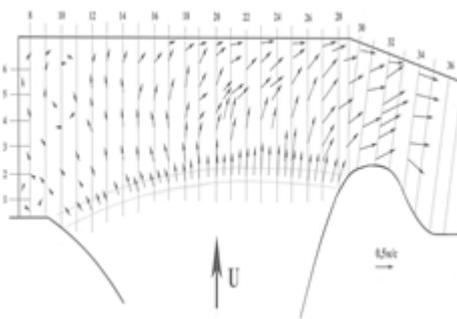


Рис. 3 – Створы расположения якорей и поле скорости в приповерхностном слое завесы

Поле давлений как на обтекаемой поверхности завесы, так и в пограничном слое регистрировалось датчиками пьезорезистивного и пьезокерамического типов. Пьезорезистивные датчики абсолютного давления позволяли измерять статическое и динамическое давление в низкочастотном диапазоне

(до 200 Гц). Эти датчики отличались повышенной стабильностью и точностью. Они были изготовлены с применением микроэлектронной техники, где радиоэлементы напылялись на кварцевую мембрану, изгибающуюся под действием приложенных нагрузок, пропорциональных давлению. В исследованиях применялись специально разработанные и изготовленные датчики, которые позволяли измерять давления от 1 Па (0,1 мм водяного столба) до 6 кПа с погрешностью 0,01%. Сгруппированные в блок (рис. 4) и установленные вертикально на дно канала, датчики абсолютного давления измеряли статическое и динамическое давление вблизи гибкой завесы по ее высоте от дна канала и до поддерживающих завесу поплавков.

Измерения пульсаций пристеночного давления и скоростного напора проводились при помощи миниатюрных датчиков пульсаций давления (рис. 5).



Рис. 4 – Группа пьезорезистивных датчиков абсолютного давления



Рис. 5 – Пьезокерамические датчики пульсаций пристеночного давления

Эти датчики, изготовленные на базе пьезокерамических чувствительных элементов, отличались повышенным пространственным разрешением и быстродействием [11]. Были разработаны и изготовлены пьезокерамические датчики пульсаций давления стержневого и мембранного типов с диаметром чувствительной поверхности 0,0013 м и 0,0016 м. Диаметры этих датчиков близки к диаметру так называемых ультраминиатюрных [12] датчиков пульсаций давления фирмы Kulite Semiconductor Products (модель ХСЕ-062). Датчики пульсаций пристеночного давления устанавливались заподлицо с обтекаемой поверхностью и регистрировали пульсации давления в диапазоне частот от 0,2 Гц до 1,5 кГц. На основе этих датчиков были созданы корреляционные блоки (рис. 5) и датчики пульсаций скоростного напора, когда чувствительный элемент датчика устанавливался, посредством державок, навстречу потоку.

Для повышения соотношения сигнал/помеха датчики давления снабжались предварительными усилителями, которые располагались на минимально возможных расстояниях от них либо в одном корпусе. Предварительные малошумные усилители усиливали электрический сигнал, генерируемый датчиками, на (20–40) дБ. Усиленный сигнал поступал на прецизионные усилители мощности, а затем контрольно-измерительную и регистрирующую аппаратуру. Сигналы пьезорезистивных датчиков и термоанемометров через полумостовые и мостовые схемы также поступали на аналогичную аппаратуру.

Экспериментальные исследования были проведены с помощью ансамблей датчиков абсолютного давления, пульсаций давления и скоростного напора, сигналы с которых оцифровывались восьми- или шестнадцатиканальными аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП), которые были установлены в системные блоки персональных компьютеров. В исследованиях использовались преобразователи фирмы National Instruments (16-битовое АЦП PCI-6031E) и фирмы L-Card (12-битовое АЦП L-154 и 14-битовое АЦП E-14-440), оснащенные, в частности, пакетами прикладных программ математического моделирования для решения задач технических вычислений, обработки и анализа экспериментальных данных.

Результаты исследований

Одновременно с измерениями поля скорости перед моделью струенаправляющего сооружения [9, 13] измерялось поле давления на поверхности полотна завесы, а также ее вибрации. Поле давления на поверхности полотна завесы определялось при помощи датчиков абсолютного давления, установленных на переносную конструкцию (рис. 4), а также датчиков пульсаций пристеночного давления (рис. 5), закрепленных на поверхности полотна завесы. Датчики абсолютного давления сообщались с исследуемой областью через трубки, на концах которых были сделаны отверстия, направленные навстречу потоку. Переносная конструкция с пятью пьезорезистивными датчиками располагалась вблизи полотна завесы струенаправляющего сооружения (рис. 6) и позволяла измерять поле статического и динамического давления на различных глубинах завесы.



Рис. 6 – Измерение поля давления на полотне завесы модели струенаправляющего сооружения

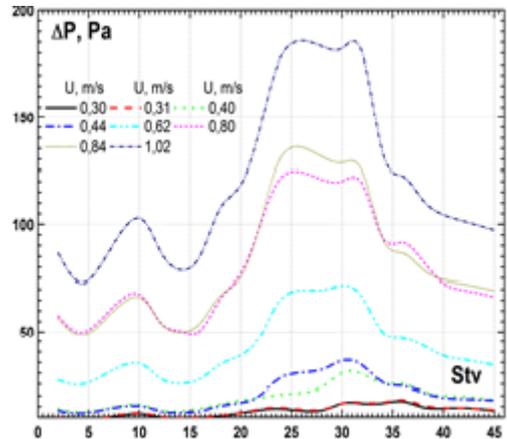


Рис. 7 – Динамическое давление на обтекаемой поверхности полотна завесы струенаправляющего сооружения

Как показали измерения, наибольшее динамическое давление, действующее на полотно завесы струенаправляющего сооружения, наблюдается в приповерхностном слое потока (до 1,5 м в натуральных условиях). Изменения осредненного динамического давления на полотно завесы в приповерхностном слое потока вдоль завесы (по створам, отвечающим номерам якорей)

представлены на рис. 7 для различных скоростей потока. Здесь по оси абсцисс отложены номера створов (номера якорей), а по оси ординат – среднее значение динамического давления, представляющее собой разницу между полным давлением на полотно завесы и статическим давлением в точке измерения ($\Delta P = P - P_{st}$). С увеличением скорости динамическое давление, действующее на полотно завесы, увеличивается, и максимальные его значения наблюдаются в области (25...32) створов (вблизи сужения потока), что коррелирует с результатами измерения поля скорости в приповерхностном слое потока (см., например, рис. 3).

Распределение средних значений динамического давления, действующего на полотно завесы, для скорости потока 0,3 м/с показано на рис. 8. Измерения показывают, что на глубине порядка 8 м (для натуральных условий) динамическое давление на завесу убывает почти на порядок в области сужения потока, оставаясь в этой области наибольшим. Когда скорость потока на дамбе выросла до 0,44 м/с (скорость, соответствующая наибольшему расходу в натуральных условиях) (рис. 9) появилась еще одна область повышенного динамического давления, а именно в области 25-го створа или 25-го якоря сооружения. При этом разница между давлениями в области сужения потока и в тупиковой области составила почти порядок. Для максимальных скоростей потока $U = 1,02$ м/с, которые исследовались, максимальные динамические давления на полотно завесы наблюдаются перед сужением потока (рис. 10).

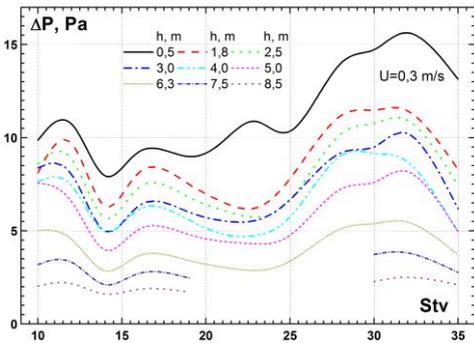


Рис. 8 – Динамическое давление на обтекаемой поверхности полотна завесы по ее глубине для числа Фруда $Fr = 0,08$

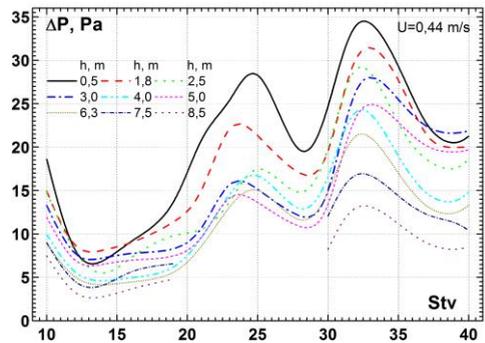


Рис. 9 – Динамическое давление на обтекаемой поверхности полотна завесы по ее глубине для числа Фруда $Fr = 0,12$

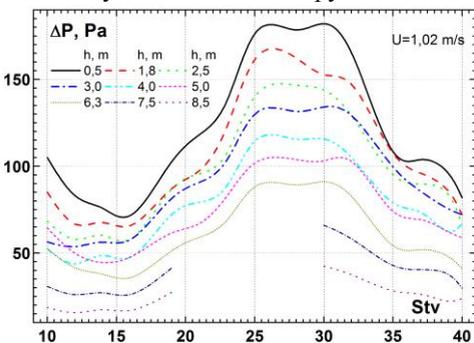


Рис. 10 – Динамическое давление на обтекаемой поверхности полотна завесы по ее глубине для числа Фруда $Fr = 0,27$

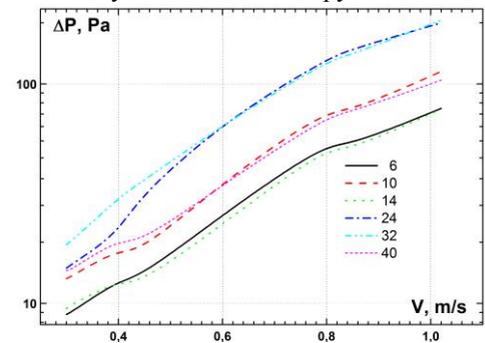


Рис. 11 – Изменение динамического давления на поверхности полотна завесы в критических створах от скорости потока

Таким образом, в распределении динамического давления, действующего на полотно завесы, наблюдается ряд характерных или экстремальных

областей вдоль полотна завесы, и изменения давления в этих критических створах показано на рис. 11. Обнаружено, что с ростом скорости давление на полотно завесы растет пропорционально квадрату скорости (для больших чисел Фруда). Для малых скоростей динамическое давление в критических створах завесы пропорционально скорости с коэффициентом степени пропорциональности, который меньше 2.

Итак, результаты исследований поля динамического давления, действующего на полотно завесы струенаправляющего сооружения, показали, что давление максимальное в приповерхностном слое завесы независимо от скорости потока.

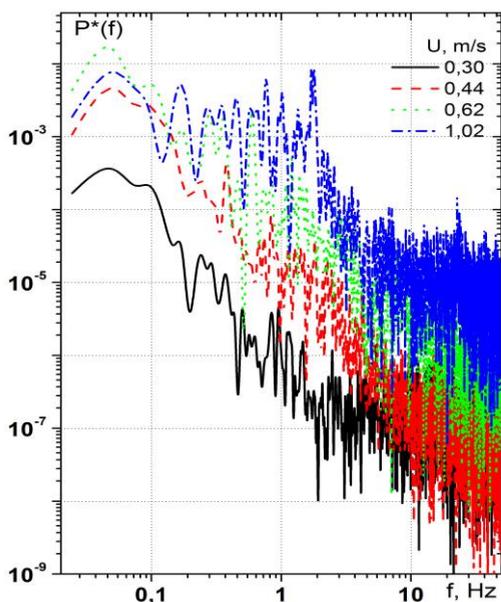


Рис. 12 – Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления на поверхности полотна завесы

пульсаций пристеночного давления, измеренные на полотне завесы, находящемся в приповерхностном слое потока. Частотные спектры, нормированные скоростным напором, получены для створа 32 и показаны для различных скоростей потока. Обнаружено, что спектральные уровни пульсаций пристеночного давления растут и наполняются высокочастотными составляющими с увеличением скорости потока. При этом в спектральных зависимостях проявляются дискретные составляющие, которые отвечают частотам колебания полотна завесы, их субгармоникам и гармоникам высших порядков.

Выводы

Результаты исследования давления вблизи модели струенаправляющего сооружения, проектируемого для акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя Южно-Украинской АЭС, дали возможность сделать следующие выводы:

1. Обнаружено, что наибольшее динамическое давление, действующее на полотно завесы струенаправляющего сооружения, наблюдается в приповерхностном слое потока (до 1,5 м в натурных условиях). С увеличением скорости

Наибольшее давление, генерируемое течением, наблюдается в области сужения потока. Когда скорость потока увеличивается, то максимальные динамические давления на поверхности полотна завесы имеют место и перед областью сужения потока.

Расположение датчиков пульсаций пристеночного давления, установленных заподлицо с обтекаемой поверхностью полотна завесы, позволило определить поле пульсаций пристеночного давления и его спектральные уровни, используя быстрое преобразование Фурье, с соответствующими весовыми окнами [14–16]. Так, на рис. 12 представлены спектральные плотности мощности

динамическое давление, действующее на полотно завесы, увеличивается, и максимальные его значения наблюдаются в области сужения потока. Обнаружено, что на глубине порядка 8 м (для натуральных условий) динамическое давление на завесу убывает почти на порядок в области сужения потока, оставаясь в этой области наибольшим. Когда скорость потока увеличивается, то максимальные динамические давления на поверхности полотна завесы имеют место и перед областью сужения потока.

2. Установлено, что с ростом скорости давление на полотно завесы растет пропорционально квадрату скорости (для больших чисел Фруда). Для малых скоростей динамическое давление в критических створах завесы пропорционально скорости с коэффициентом степени пропорциональности, который меньше 2.

3. Обнаружено, что спектральные уровни пульсаций пристеночного давления растут и наполняются высокочастотными составляющими с увеличением скорости потока. При этом в спектральных зависимостях проявляются дискретные составляющие, которые отвечают частотам колебания полотна завесы, их субгармоникам и гармоникам высших порядков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романенко В.Д. Гідроекологічна безпека атомної енергетики в Україні / В.Д. Романенко, М.І. Кузьменко, С.О. Афанасьєв, Д.І. Гудков [и др.] // Вісник НАН України. – 2012. – № 6. – С. 41–51.
2. Доманов В.Н. Процессы теплообмена водоемов–охладителей с атмосферой / В.Н. Доманов, А.Г. Костин, Е.И. Никифорович. К.: НПП «Издательство Наукова думка НАН Украины». 2011. – 319 с.
3. Расчеты гидротермических показателей Ташлыкского водоема-охладителя методами трехмерного моделирования для обоснования решений, разрабатываемых в рамках ТЭР по улучшению охлаждающей способности ТВО с учетом расширения Южно-Украинского энергокомплекса. Отчет по договору № 3-Ю/08 от 28.01.2009. – К.: УЦЭВП, 2009. – 202 с.
4. Антонова Л.Н. Назначение и особенности условий работы водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций / Л.Н. Антонова, Г.И. Канюк, Т.Е. Погонина, Д.М. Михайский [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012.– Вып. 2/10 (56). – С. 56–63.
5. Омельченко М.П. Вопросы рациональных компоновочных решений гидротехнических сооружений на водоемах-охладителях ТЭС и АЭС / М.П. Омельченко, Л.Н. Антонова [и др.]. – Харьков: ХУПС, 2009. – 239 с.
6. Расчеты гидротермических и гидрохимических показателей режима Ташлыкского водоема-охладителя методами трехмерного моделирования с учетом расширения ТГАЭС Отчет по договору № 2-Ю/07 от 30.11.2007. – К: УЦЭВП, 2008. – 198 с.
7. Расчеты гидротермических показателей Ташлыкского водоема-охладителя методами трехмерного моделирования для обоснования решений, разрабатываемых в рамках ТЭР по улучшению охлаждающей способности ТВО с учетом расширения Южно-Украинского энергокомплекса Отчет по договору № 3-Ю/08 от 28.01.2009. – К: УЦЭВП, 2009. – 202 с.
8. Модельные исследования напряженно-деформированного состояния полотна завесы и динамических нагрузок на якорную систему струенаправляющего сооружения в акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя Южно-Украинской АЭС. Исходные данные для выполнения НИР. – Харьков: ОАО Харьковский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Энергопроект», 2014. – 7 с.

9. Модельные исследования напряженно-деформированного состояния полотна завесы и динамических нагрузок на якорную систему струенаправляющего сооружения в акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя Южно-Украинской АЭС Отчет по договору № 2-2014 от 25.06.2014. – К: ИГМ НАНУ, 2014. – 143 с.
10. Воскобойник В.А., Фізичне моделювання течії поблизу гнучкої струмененаправляючої завеси / В.А. Воскобойник, В.В. Хомицький, О.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник, І.А. Хижа // Екологічна безпека та природокористування. – 2015. – Вип. 17, № 1. – С. 65–73.
11. Воскобойник В.А. Псевдозвук за препятствием на продольно обтекаемом цилиндре / В.А. Воскобойник, В.Т. Гринченко, А.П. Макаренко // Акустичний вісник. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 22–36.
12. Solomon J.T. High-bandwidth pulsed microactuators for high-speed flow control / J.T. Solomon, R. Kumar, F.S. Alvi // AIAA J. – 2010. – Vol. 48, № 10. – P. 2386–2396.
13. Воскобойник А.А. Обтекание гибкой струенаправляющей завесы / А.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник, И.А. Хижа, В.В. Хомицкий // Прикладна гідромеханіка. – 2015. – Т. 17, № 1. – С. 10–20.
14. Бендат Дж. Измерение и анализ случайных процессов: Пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1974. – 464 с.
15. Воскобойник А.А. Пульсации давления на поверхности размыва грунта / А.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник, В.И. Никишов // Прикладна гідромеханіка. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 27–35.
16. Voskoboinick V. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements / V. Voskoboinick, N. Kornev, J. Turnow // Flow Turbulence Combust. – 2013. – Vol. 90, № 2. – P. 86–99.

Стаття надійшла до редакції 21.04.2016