

УДК 532.5

ОБТЕКАНИЕ ГИБКОЙ СТРУЕНАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЗАВЕСЫ

А. А. ВОСКОВОЙНИК, А. В. ВОСКОВОЙНИК, В. А. ВОСКОВОЙНИК,
И. А. ХИЖА, В. В. ХОМИЦКИЙ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев,
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4
email: vlad.vsk@gmail.com

Получено 21.10.2014

Представлены результаты экспериментальных исследований кинематических характеристик течения вблизи полотна завесы модели струенаправляющего сооружения, спроектированного для акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя Южно-Украинской АЭС. Визуальные исследования и измерения полей скорости показали, что вблизи тупиковой части сооружения формируется крупномасштабная циркуляционная структура и интенсивное струйное течение в области сужения потока. В приповерхностном слое потока течение направлено от водораспределительной дамбы к полотну завесы, а далее вдоль завесы на выход из струенаправляющего сооружения, и максимальная скорость наблюдается вблизи сужения потока. В придонном слое зарегистрировано низкоскоростное возвратное течение, особенно в тупиковой части сооружения и местах больших глубин вблизи полотна завесы. В области сужения потока придонное течение имеет повышенную скорость и направлено на выход из сооружения, подобно приповерхностному слою потока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: струенаправляющее сооружение, гибкая завеса, визуализация, поле скорости, циркуляция, струйное течение

Наведено результати експериментальних досліджень кінематичних характеристик течії поблизу полотна завіси моделі струмененаправляючої споруди, спроектованої для акваторії Ташлицького водосховища-охолоджувача Південно-Української АЕС. Візуальні дослідження та вимірювання полів швидкості показали, що поблизу тупикової частини споруди формується великомасштабна циркуляційна структура та інтенсивна струменева течія в області звуження потоку. У приповерхневому шарі потоку течія направлена від водорозподільчої дамби до полотна завіси, а далі вздовж завіси на вихід із струмененаправляючої споруди, і максимальна швидкість спостерігається поблизу звуження потоку. У придонному шарі зареєстрована низькошвидкісна зворотна течія, особливо у тупиковій частині споруди та місцях великих глибин поблизу полотна завіси. В області звуження потоку придонна течія має більшу швидкість і спрямована на вихід зі споруди, подібно приповерхневому шару потоку.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: струмененаправляюча споруда, гнучка завіса, візуалізація, поле швидкості, циркуляція, струменева течія

The results of experimental researches of flow kinematics near-by screen linen of the training construction model, projected for the water area of Tashlyk cooling pond of South-Ukraine nuclear power station are presented. Visualizations and velocity measurements shown that near-by dead-locked part of the construction a large-scale circulation structure and intensive jet flow are formed in area of the stream contraction. In the surface layer a flow is directed from a water-dividing dam to the screen linen and further along the screen on an exit from the training construction and high velocity is observed near-by the stream contraction. A low-velocity recurrent flow is incorporated in a near-bottom layer, especially in dead-locked part of the construction and places of large depths near-by the screen linen. In area of the stream contraction a near-bottom flow has high velocity and it's directed on an exit from the construction, like the surface layer of stream.

KEY WORDS: training construction, flexible screen, visualization, velocity field, circulation, jet flow

ВВЕДЕНИЕ

В энергообеспечении народнохозяйственного комплекса страны ведущую роль играют атомные электростанции (АЭС), на долю которых приходится около 50% электроэнергии, производимой электростанциями Украины [1]. Для нормального функционирования АЭС возникает необходимость отвода системами охлаждения в окружающую среду огромного количества тепла, составляющего около 70% энергии потребляемого топлива [2]. Одно из важнейших условий надежной эксплуатации АЭС – бесперебойное

водообеспечение, источниками которого служат реки, водохранилища и водоемы-охладители. К сожалению, уже исчерпаны возможности применения наиболее экономичных прямоточных систем технического водоснабжения электростанций, и широкое распространение получает обратное водоснабжение, базирующееся на водоемах-охладителях, градирнях и брызгальных установках, а также комбинированные системы охлаждения, основанные на совместном использовании этих охладителей в различных вариантах.

Среди основных гидрологических факторов, ко-

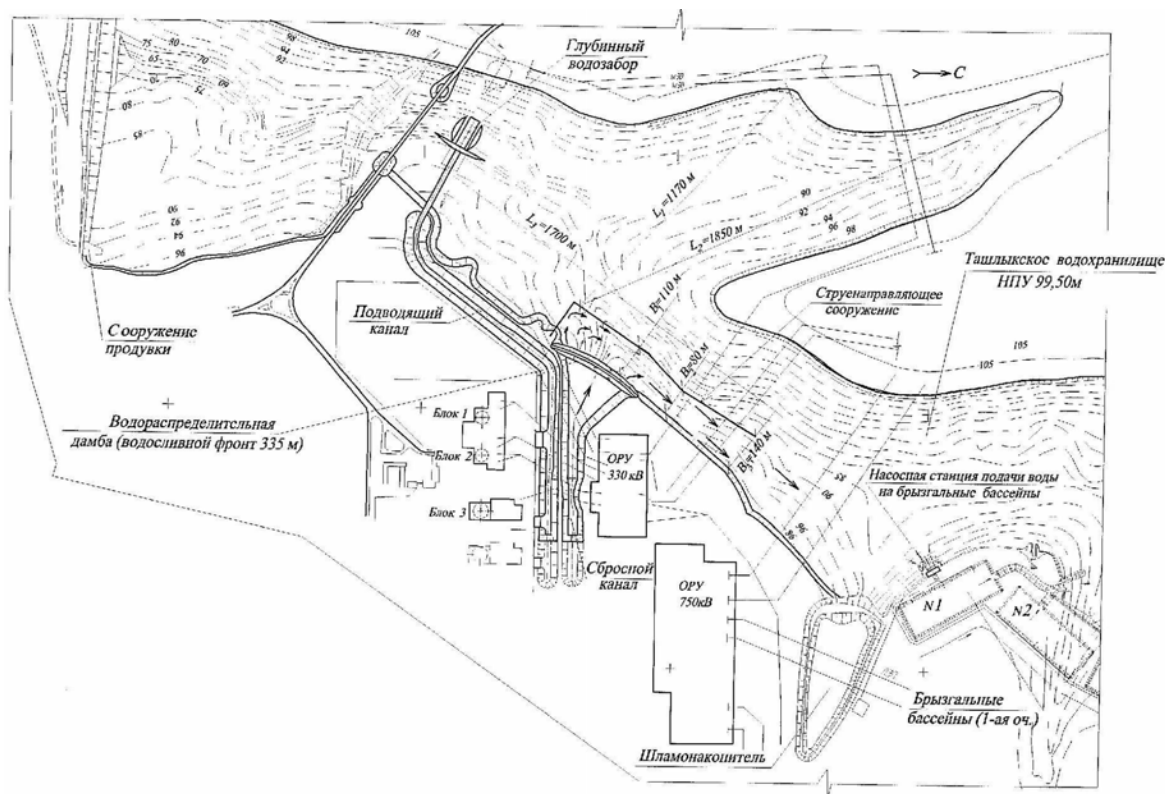


Рис. 1. Схема размещения струнаправляющего сооружения в акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя

торые определяют условия функционирования экосистем водоемов-охладителей атомных электростанций Украины, важное место занимают процессы водообмена, гидродинамики водоема и тепловой (термический) режим водных масс. Пренебрежение этими процессами уже привело к нарушениям в эксплуатации некоторых водоемов-охладителей. Так, на водоеме-охладителе Чернобыльской АЭС значительная часть объема воды (ниже 7-9-метровой изобаты) принимала слабое участие в охлаждении подогретых вод, которые сбрасываются станцией. То же касается и Ташлыкского водоема [1]. Ташлыкское водохранилище-охладитель Южно-Украинской АЭС 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. Из-за этого суммарная мощность АЭС ограничивается величиной 1800 МВт.

Эффективность охлаждения воды в водоеме-охладителе, а, следовательно, и его гидротермический режим зависят напрямую от схемы органи-

зации движения потока, которая должна обеспечивать наиболее низкие температуры охлажденной воды при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах [3]. Как показано в работе [4], компонентная схема водозаборных и водовыпускных сооружений Ташлыкского водоема-охладителя 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 [5] предложено применить струнаправляющую завесу (рис. 1), которая способна разделить теплые воды, сбрасываемые в водоем, от вод нижнего слоя водоема, которые попадают в водозаборные сооружения. Это позволяет разделить поток не только по вертикали, но и по горизонтали. Как показали расчеты [6], струнаправляющее сооружение, которое достигает дна водохранилища, разделяет потоки воды на водосбросе и водозаборе, улучшая, таким образом, тепловой режим работы Ташлыкского водохранилища-охладителя. При этом разница температур на водосбросе и водоза-



Рис. 2. Схема струенаправляющего сооружения

боре достигает нескольких градусов. Проведенные технико-экономические расчеты [6] 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.

На струенаправляющую завесу, которая достигает дна водоема, действуют нестационарные пристеночные и придонные течения, которые вызывают изгибание 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, действующих как на завесу, так и на якорную систему, которая удерживает ее [7]. Для определения этих сил, а также для получения качественных и количественных характеристик структуры течения, напряженно-деформированного состояния полотна завесы и динамических нагрузок на якорную систему модели струенаправляющего сооружения проводятся численные и экспериментальные научно-исследовательские работы.

Цель исследований – определение особенностей формирования и кинематических характеристик струйных и вихревых течений вблизи полотна гибкой завесы модели струенаправляющего сооружения, спроектированного для акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя Южно-

Украинской АЭС.

Выполнение работ осуществлено методами физического эксперимента в лабораторных условиях. Для измерения турбулентных полей скорости использовался специально разработанный и изготовленный стенд на базе гидродинамического лотка и канала. Стенд оснащался датчиками скорости и динамического давления, контрольно-измерительной аппаратурой и средствами анализа и регистрации данных. Помимо инструментальных измерений, проводилась визуализация потока с помощью красителей, контрастных веществ, подаваемых в поток, и плавучих частиц. В системах обработки и анализа экспериментальных данных использованы статистические и условные методы, с применением пространственно-временного корреляционного и спектрального анализов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу разработки и изготовления экспериментального стенда положена схема струенаправляющего сооружения, показанная на рис. 2. Струенаправляющее сооружение (завеса) располагается в акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя на расстоянии 80...140 м от его восточной части. Расстояние от струенаправляющего сооружения до противоположного берега водохранилища составляют 1170...1700 м. Глубины в месте расположения завесы изменяются в зависимости от рельефа дна от 1 до 15.2 м. Средние глубины в огражденной части равняются 4.4...10.4 м. Скорости течения потока через водораспределитель-



Рис. 3. Экспериментальный стенд на базе гидродинамического лотка и канала



Рис. 4. Входная часть гидродинамического канала с направляющими поток конструкциями

ную дамбу теплого отсека длиной 335 м составляют $0.14...0.44$ м/с при расходах $47.3...147.7$ м³/с. Скорости течения в коридоре, образованном струенаправляющим сооружением и берегом, изменяются в зависимости от величины циркуляционного расхода и глубины его распространения.

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 "Naugenplast" (Израиль). Устойчивость струенаправляющего сооружения в проектом положении обеспечивается якорной системой (бетонные якоря и якорные цепи) и анкерной опорой, размещенной на берегу водохранилища.

Физическое моделирование обтекания гибкого полотна завесы проводилось в гидродинамическом канале, который был составной частью экспериментального стенда, состоящего как из канала, так и гидродинамического лотка (рис. 3). Исхо-

дя из возможностей технологического оборудования и площади лабораторного помещения, модель струенаправляющего сооружения была изготовлена в горизонтальной плоскости в масштабе 1:100 и в вертикальной плоскости в масштабе 1:25 относительно натуре.

Подача воды и контроль ее расхода проводились в гидродинамическом лотке длиной 16 м, шириной 1 м и глубиной 0.8 м. Вода в лоток подавалась через успокоительную камеру насосами. Из успокоительной камеры поток воды проходил конфузорный отсек и через хонейкомбы и турбулизирующие сетки поступал на вход гидродинамического лотка. Измерительный участок, оборудованный аппаратурой и средствами регистрации характеристик набегающего потока, координатными приспособлениями, располагался на расстоянии 8.0 м от входной части лотка. Пленочные двухкомпонентные термоанемометры фирмы "Disa" (Дания), датчики скорости потока в виде трубки Пито, а также пьезорезистивные датчики глубины потока, закрепленные на хорошо обтекаемых державках и установленные на координатном устройстве, располагались в измерительном участке гидроди-

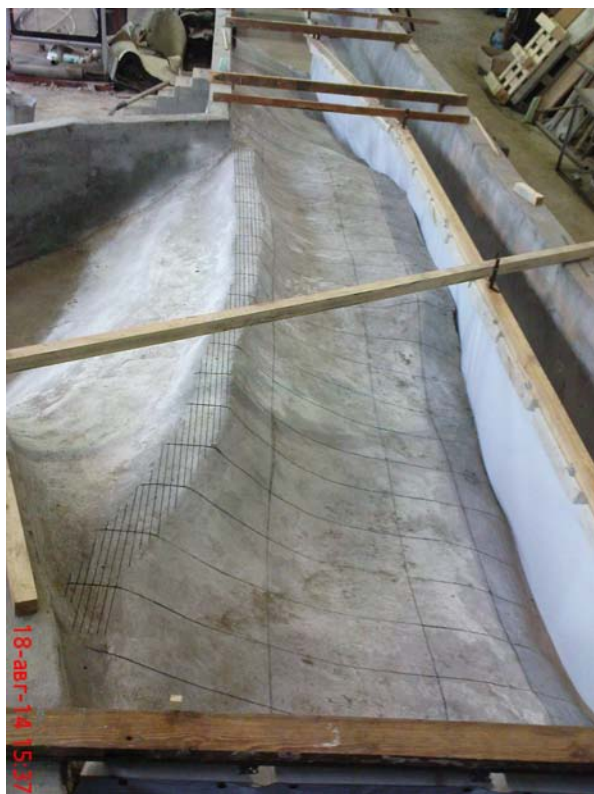


Рис. 5. Рельеф дна канала вблизи модели струенаправляющего сооружения

намического лотка и перемещались по заданной программе в исследуемые области потока. Глубина потока и его скорость регулировалась посредством специального оборудования, позволяющего плавно изменять эти параметры. При проведении исследований глубина потока составляла от 0.2 до 0.4 м, скорости течения изменялись от 0.02 до 0.5 м/с, а расход воды в гидродинамическом лотке изменялся от 0.004 до 0.2 м³/с.

Гидродинамический канал длиной 14 м, шириной 1.5 м и глубиной 0.7 м имел открытую поверхность воды. Во входной части канала была сделана ниша длиной 4.2 м, шириной 0.8 м и высотой 0.7 м, где поток воды направлялся со сливной емкости перпендикулярно продольной оси канала (рис. 4). В сливной емкости, куда вода попадала из гидродинамического лотка, располагались успокоительные элементы для уменьшения турбулизации потока и придания ему приемлемых гидродинамических характеристик. Во входной нише канала были установлены направляющие конструкции, которые позволили равномерно направить входящий поток по всей дамбе модели струенаправляющего сооружения. Во входной части ка-

нала (напротив направляющих конструкций) был забетонирован рельеф дна (рис. 5), отвечающий топологии водохранилища-охладителя. На обтекаемой поверхности дна специально были забетонированы дюбеля, к которым впоследствии крепились якоря, гибкая завеса и узлы креплений датчиков. 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 соответствуют числа Фруда $Fr = U/\sqrt{gH}$ от 0.08 до 0.27, числа Рейнольдса $Re = UH/\nu$ от 3600 до 12600.

Модель гибкой завесы длиной около 9 м и шириной 0.6 м была сделана из армированной и прорезиненной ткани "Sealtex 650" толщиной порядка 0.7 мм. Эта ткань, применяемая для производства тентов большегрузных автомобилей, изготавливается по литой технологии на основе полиэстера. Верхняя часть полотна завесы, которая крепилась к понтонам, была подвернута и проклеена для придания ей большей прочности. В нижней части полотна устанавливались люверсы, через которые полотно завесы крепилось к бетонному дну гидродинамического канала.

При монтаже гибкой завесы пенопластовые поплавки, к которым крепилось полотно завесы, закреплялись на рейках, установленных под нивелир, над поверхностью дна канала на высоте, отвечающей модельной глубине водохранилища-охладителя в соответствии с предоставленными чертежами (рис. 2). Затем к бетонному дну канала крепилась нижняя часть полотна и позади закрепленной завесы бетонировалось дно канала с учетом его профиля. После этого к бетонному дну канала и к боковым стенкам поплавков прикреплялись модели якорных цепей. В качестве этих моделей использовалась малорастяжимая тонкая (диаметром 0.2 мм) стальная рыболовная проволока, которая одинаково натягивалась к якорным кронштейнам по идентичности тонального звучания, подобно настройке гитарных струн. В результате гибкая завеса была установлена над рельефным дном канала с соблюдением заданной геометрии (рис. 5) и поддерживающие ее поплавки находились на фиксированной глубине, а модели якорных цепей были равномерно натянуты.

При проведении визуализации в качестве контрастного вещества использовались цветные чернила и красители, а также поплавки, пенопластовые шарики, древесные опилки и взвешенные частички диаметром порядка 1 мм нейтральной или близкой к нейтральной плавучести. Цветные чернила или красители вводились в поток посредством миниатюрных трубок, закрепленных в дер-



Рис. 6. Размещение датчиков скорости, давления и вибраций в измерительном участке гидродинамического канала

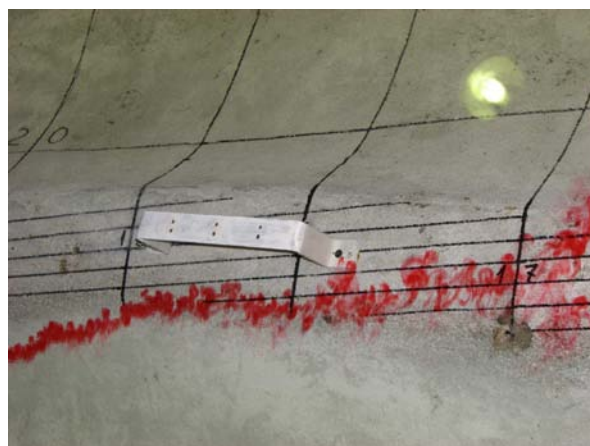


Рис. 7. Визуализация течения над дамбой модели струенаправляющего сооружения

жавках координатных устройств. В зависимости от скорости набегающего потока расход красителей регулировался, а координатные устройства давали возможность расположить струйку красящего вещества в то место, где необходимо было визуализировать течение. Наряду с этим, для оперативности красящие вещества, находящиеся в полиэтиленовых бутылках, посредством длинных тонкостенных трубок вводились в исследуемые области вручную, создавая облако подкрашенной жидкости. Использование разноцветных красителей позволило определить характерные места формирования и развития вихревых систем и струйных течений, которые возникали при обтекании как гибкой завесы, так и поверхности канала вблизи нее.

Использование плавучих контрастных тел малого размера, а также поплавков, которые перемещались на поверхности и в приповерхностном слое потока, позволило определить направление движения поверхностного течения, а также оценить его скорость. Цветные красители и частички нейтральной плавучести, которые перемещались в толще воды (на фиксированной глубине), дали возможность оценить поле течения и его скорость в характерных областях максимальных нагрузок на струенаправляющую завесу и на ее якорную систему.

При визуализации поля вихревого и струйного движения использовалась подсветка лазерными лучами и светодиодными ножами, что позволяло исследовать вихревые течения в заданных плоскостях. Проследить за объемной картиной течения контрастных покрытий и красящих веществ позволяли мощные прожекторы и галогенные лампы. Применение высокооборотных синхронизиру-

ющих импульсов света, электрических разрядов и акустического излучения дало возможность синхронизировать визуальные исследования и инструментальные измерения характеристик вихревого движения.

Регистрация картин визуализации гидродинамических процессов была произведена видео- и фотоаппаратурой, с последующей распечаткой снимков и анализом полученных видеоматериалов. Наиболее информативные кадры и картины процессов оцифровывались и вводились в персональный компьютер для последующей обработки и анализа с помощью специальных программ и методик [8-10]. Результаты визуальных исследований обрабатывались на специально созданных графических станциях, где можно было провести ускоренное или замедленное воспроизведение видеозаписей либо покадровый анализ данных. Графические станции на базе двух или четырехпроцессорных компьютеров, обладающие повышенной памятью и быстродействием, дали возможность наблюдать поведение контрастных веществ и меченых частиц в сложном вихревом поле. Разрешение на уровне единиц пикселей позволило довольно точно определить траектории движения меченых частиц и векторы скоростей их переноса в вихревом потоке.

При измерениях поля скоростей использовались пленочные одно- и двухкомпонентные термоанемометры фирмы "Disa", а также пьезокерамические и пьезорезистивные датчики скоростного напора или динамического давления, изготовленные в виде трубки Пито (диаметр чувствительной поверхности $0.8 \cdot 10^{-3}$ м и $1.2 \cdot 10^{-3}$ м) (рис. 6). Электрические сигналы от датчиков поступали



Рис. 8. Визуализация приповерхностного слоя потока перед полотном завесы



Рис. 9. Визуализация течения вблизи полотна завесы частичками, имеющими положительную плавучесть

на комплект аппаратуры фирмы "Disa", обеспечивающей работу термоанемометров в режиме постоянной температуры. Показания осредненных и пульсационных скоростей (среднеквадратичные значения) заносились в протоколы испытаний для последующей обработки и анализа данных, а также вводились в компьютеры посредством аналогово-цифровых преобразователей. Параллельно этому электрические сигналы с выхода блока усиления и линеаризатора типа 55M01 и 55D25 фирмы "Disa" регистрировались на четырехканальном измерительном магнитофоне типа 7005 фирмы "Bruel & Kjaer". Кроме того, на магнитофоне записывались сигналы от виброакселерометров, которые были установлены на державках датчиков, на полотне завесы, на стенках измерительных участков гидродинамического лотка и канала для учета вибрационных помех на результаты измерений.

Экспериментальные исследования были проведены с помощью группы датчиков скоростного напора и термоанемометров, сигналы с которых оцифровывались восьми- или шестнадцатиканальными аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП), которые были установлены в системные блоки персональных компьютеров. В исследованиях использовались преобразователи 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 "MatLab 9.0", "LabView 9.1", "OriginPro 8.5".

Программа проведения физического моделиро-

вания предусматривала использование визуальных и инструментальных методов исследований. Визуализация течения различными методами позволила определить характерные области эволюции струйного и вихревого течения в окрестности гибкой завесы и входного участка модели струенаправляющего сооружения. В результате получены траектории движения подкрашенных областей жидкости, направления движения меченых частиц и оценены их скорости переноса. В характерных областях взаимодействия потока с полотном завесы проведены измерения поля скоростей и давления посредством специально разработанных и изготовленных датчиков.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно разработанной программе и методике исследований красящие вещества вводились в поток на различной его глубине и регистрировались стационарными и переносными видеокамерами. Когда краска вводилась перед дамбой (рис. 7), то она перемещалась с ускорением над поверхностью дамбы. При этом скорость переноса контрастного вещества была ниже над той частью дамбы, которая находится вблизи тупиковой части струенаправляющего сооружения. За дамбой краска в приповерхностном слое потока устремлялась к полотну завесы (рис. 8), а затем вдоль полотна переносилась в сторону открытого водохранилища. Результаты исследований показали, что вблизи дамбы перед областью сужения потока наблюдается возвратное течение. Вблизи полотна завесы подкрашенная жидкость, перемещаясь наружу из модели струенаправляющего сооружения, также пе-

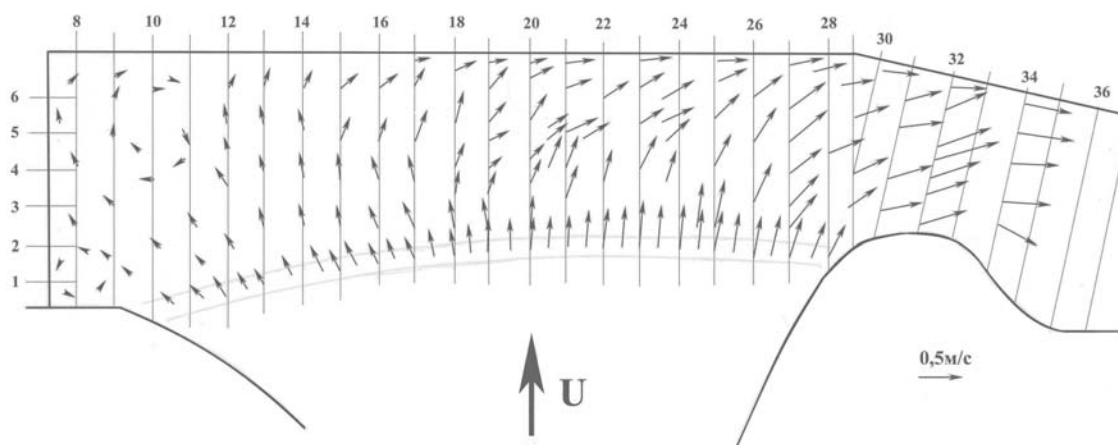


Рис. 10. Поле скорости приповерхностного слоя потока вблизи струенаправляющего сооружения

реносится из приповерхностного слоя потока в его придонную часть. Затем вдоль дна канала подкрашенная жидкость медленно перемещается к дамбе, указывая на то, что поток воды перед струенаправляющим сооружением совершает циркуляционное движение. Такое поперечное циркуляционное течение с осью, направленной параллельно срединной части завесы, особенно отчетливо проявляется в области наибольших глубин перед сооружением (створы 12-18).

Использование легких частиц, обладающих положительной плавучестью, для визуализации поверхностного течения позволило выявить характерные особенности этого течения. Во входной части исследуемого сооружения плавающие частички показали относительную равномерность поля скорости вдоль дамбы сооружения, а в его тупиковой области отобразили направление движения поверхностного слоя потока. Для большой скорости потока (0.2 м/с) плавающие частички позволили обнаружить места циркуляционного течения, а также области повышенных скоростей вблизи полотна завесы (рис. 9). Установлено, что с увеличением скорости в срединной части полотна завесы плавающие частички подходят на большее расстояние до завесы, из-за интенсивного течения вдоль нее.

Одновременно с визуализацией течения проводились измерения скорости потока над дамбой и внутри гидродинамического лотка с помощью датчиков динамического давления и пленочных термоанемометров. По измерениям скорости потока в лотке определялся расход воды в лотке, который был равен расходу в гидродинамическом канале. По этому расходу рассчитывалась среднера-

сходная скорость над дамбой. В ходе экспериментальных исследований среднерасходная скорость над дамбой модели струенаправляющего сооружения изменялась от 0.06 до 0.2 м/с, что соответствовало натурным среднерасходным скоростям от 0.3 до 1 м/с или от $0.7U_{max}$ до $2.3U_{max}$, где $U_{max}=0.44$ м/с – скорость потока над дамбой для максимального расхода теплового отсека.

Характерные примеры распределения скоростей над дамбой и вблизи полотна завесы модели струенаправляющего сооружения представлены на рис. 10 и 11 для среднерасходной скорости над дамбой модели 0.09 м/с или для натурной скорости 0.44 м/с, которая соответствует максимальному расходу $147.7 \text{ м}^3/\text{с}$ через водосливную дамбу теплового отсека. Для этих скоростей число Фруда, рассчитанное по глубине потока над дамбой в натурных либо в лабораторных условиях, составляет 0.12. На рис. 10 приведены результаты измерения поля скорости в приповерхностном слое на глубине (1...1.2) м в пересчете для натурных условий. Обнаружено, что над дамбой скорость растет при приближении к выходной части струенаправляющего сооружения и это обусловлено тормозящим действием тупиковой части сооружения на поток. В приповерхностном слое тупиковой части сооружения наблюдаются циркуляционные области и области заторможенного течения. Вдоль полотна завесы течение направлено параллельно полотну и ускоряется с удалением от тупиковой части сооружения. Над областью подъема дна водохранилища (створы 19-21) перед полотном завесы в приповерхностном слое наблюдается ускорение потока и относительно резкое изменение направления его к выходу из сооружения. В области изгиба завесы

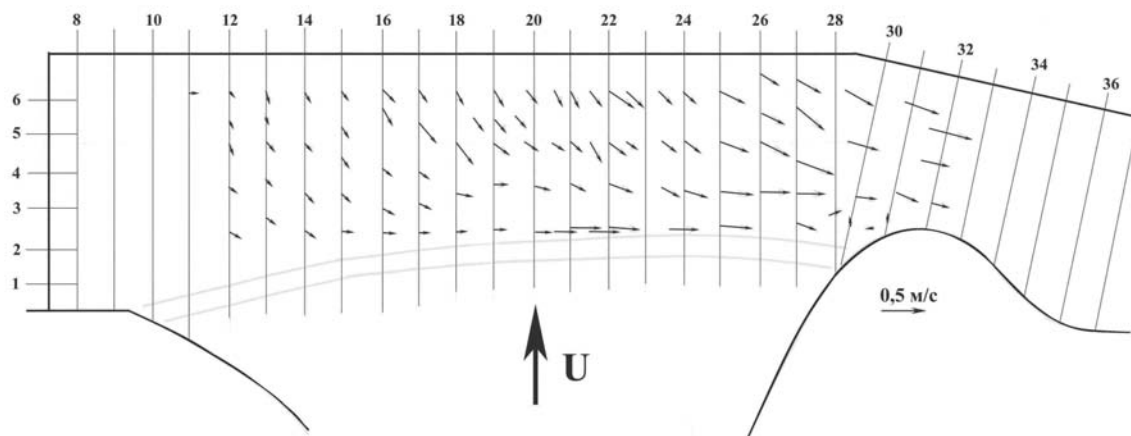


Рис. 11. Поле скорости придонного течения вблизи струнаправляющего сооружения

(створы 30-32) поток с высокой скоростью натекает на полотно завесы. Обнаружено, что в пересчете для натуральных условий максимальная скорость в приповерхностном слое на глубине около 1 м будет наблюдаться в области сужения потока и достигнет значения порядка (0.65...0.75) м/с.

Поле скорости в придонной области исследуемой модели струнаправляющего сооружения на расстоянии порядка 0.02 м (0.5 м для натуры) представлено на рис. 11. Здесь поле скорости существенно отличается от того, которое измерено в приповерхностном слое. Вблизи дна, особенно в тушиковой области и области наибольших глубин перед полотном завесы, зарегистрировано возвратное течение, которое имеет направление от завесы к дамбе, что подтверждается визуальными исследованиями, результаты которых приведены выше. У вершины дамбы со стороны струнаправляющей завесы наблюдается относительно высокоскоростное течение, направленное от тушиковой части сооружения в сторону его выхода. При этом скорость этого течения растет с приближением к выходу из сооружения, но перед берегом, выступающим в водохранилище (сужение потока), зафиксировано низкоскоростное возвратное течение. В области сужения потока скорость придонного течения увеличивается подобно течению в приповерхностном слое потока.

Итак, результаты измерения поля скорости в приповерхностном слое и в придонной области, пересчитанные для натуральных условий с максимальным расходом, показывают, что в потоке вблизи струнаправляющей завесы существует интенсивное поперечное циркуляционное течение, ось которого вытянута вдоль полотна завесы. Как пока-

зали визуальные исследования, наиболее отчетливо циркуляционное течение наблюдается в области наибольших глубин перед полотном завесы.

Исследования, проведенные для меньших скоростей потока, свидетельствуют, что с уменьшением скорости циркуляционное течение вырождается и векторы скорости более плавно меняют направление от перпендикулярного к завесе до параллельного к ней. Для максимальных скоростей потока, при которых проводились исследования, характерные области формирования циркуляционного и возвратного течения наблюдались более отчетливо. Но отношение минимальных и максимальных скоростей как в приповерхностном слое потока, так и в его придонной части оставались такими же, как для результатов, приведенных на рис. 10 и 11. А именно, максимальные скорости возвратного течения составляли $(0.05...0.1)U$, а максимальные скорости, наблюдаемые в области сужения потока, составляли $(0.6...0.8)U$.

ВЫВОДЫ

1. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд, состоящий из гидродинамического лотка и канала, системы крепления модели гибкого полотна завесы, координатных устройств, контрольно-измерительной аппаратуры, средств визуализации потока, аппаратуры анализа и регистрации данных.
2. Проведены экспериментальные исследования гидродинамической структуры потока, который обтекает модель струнаправляющего со-

оружения, и определены кинематические характеристики струйного и вихревого течения. Проведена визуализация вихревых образований посредством красящих веществ, которые вводились в поток, и частиц положительной плавучести, с одновременным измерением физических параметров потока. Выявлены характерные особенности формирования и развития пристеночных течений вблизи гибкого полотна завесы. Определено их влияние на характеристики поля скорости.

3. Обнаружено, что скорость переноса контрастного вещества уменьшалась над той частью дамбы, которая находится вблизи тупиковой стороны струенаправляющего сооружения (створ 8-15). За дамбой красящее вещество в приповерхностном слое потока устремляется к полотну завесы, а затем вдоль полотна переносится в сторону открытого водохранилища. Вблизи полотна завесы подкрашенная жидкость переносится из приповерхностного слоя потока в его придонную часть, а далее, противоположно направлению потока, вдоль дна канала медленно перемещается к дамбе, указывая на то, что поток воды перед струенаправляющим сооружением совершает циркуляционное движение. Такое поперечное циркуляционное течение с осью, вытянутой параллельно направлению завесы, особенно отчетливо проявляется в глубоководной части сооружения. Обнаружено, что с увеличением скорости плавающие частички в срединной части полотна завесы подходят на большее расстояние к ней из-за интенсивного спутного течения.
4. В результате измерений поля скорости обнаружено, что над дамбой скорость растет при приближении к выходной части струенаправляющего сооружения и это обусловлено тормозящим действием тупиковой части сооружения на поток. В приповерхностном слое тупиковой части сооружения наблюдаются циркуляционные области и области заторможенного течения. Вдоль полотна завесы течение направлено параллельно полотну и ускоряется с удалением от тупиковой части сооружения. Над областью подъема дна водохранилища (створы 19-21) перед полотном завесы в приповерхностном слое наблюдается ускорение потока и относительно резкое изменение направления его движения к выходу из сооружения. В области изгиба завесы (створы

30-32) поток с высокой скоростью натекает на полотно завесы.

5. Обнаружено, что в пересчете для натуральных условий максимальная скорость в приповерхностном слое на глубине около 1 м будет наблюдаться в области сужения потока и достигнет значения порядка (0.65...0.75) м/с. Установлено, что на глубине 0.5 м над дном, особенно в тупиковой области сооружения и области наибольших глубин перед полотном завесы, появляется возвратное течение, которое имеет направление от завесы к дамбе. Максимальные скорости возвратного течения составляют (0.05...0.1) среднерасходной скорости над дамбой. У вершины дамбы со стороны струенаправляющей завесы наблюдается относительно высокоскоростное течение, направленное от тупиковой части сооружения в сторону его выхода в водоем-охладитель. При этом скорость этого течения растет с приближением к выходу из сооружения, но перед берегом, выступающим в водохранилище (сужение потока), появляется низкоскоростное возвратное течение со скоростью порядка 0.05 м/с. В области сужения потока скорость придонного течения увеличивается подобно течению в приповерхностном слое потока.

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.– Киев: Наукова думка, 2011.– 320 с.
3. 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.– 2, № 10(56).– С. 55–63.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
 8. *Adrian R. J.* Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics / R.J. Adrian // *Annu. Rev. Fluid Mech.*– 1991.– **23**.– P. 261–304.
 9. *Faure T. M.* Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers / T.M. Faure, P. Adrianos, F. Lusseyran, L. Pastur // *Exp. Fluids.*– 2007.– **42**.– P. 169–184.
 10. *Воскобойник В. А.* Визуализация вихревого течения внутри и вблизи поперечно обтекаемой овальной лунки на плоской поверхности / В.А. Воскобойник, А.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // *Промышленная теплотехника.*– 2014.– **36**, № 3.– С. 13–21.