

рование. – М.: Мир, 1984. – 280 с.

3. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.

4. Zhao J., Zhe J. Hydraulics. – China: WaterPower Press, 2007. – 350 p.

Материал поступил в редакцию 15.05.13.

Румянцев Игорь Семенович, доктор технических наук, профессор, заслужен-

ный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Гидротехнические сооружения»

Тел. 8 (499) 976-24-60

E-mail: rummyantsev.rumi@yandex.ru

Нань Фэн, магистр техники и технологий, аспирант

Тел. 8 (965) 422-71-46

E-mail: nanfeng@yandex.ru

УДК 502/504:627.83

Н. Н. РОЗАНОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В ВИХРЕВЫХ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Изложены принципы физического моделирования водосбросных сооружений, работающих в условиях пропуска закрученного потока. Дана практическая рекомендация по моделированию вихревых водосбросов при поступлении аэрированного потока в водовод с закрученным потоком.

Закрученный поток, ядро закрученного потока, водяное кольцо закрученного потока, параметр закрутки потока, геометрический параметр завихрителя потока, воздухозахват, воздухосодержание, критерии подобия, аэрационная шахта.

There are stated principles of physical simulation of the spillways working under the conditions of swirling flow passage. There is given a practical recommendation on simulation of swirling spillways under the aerated flow entering into a water conduit with a swirling flow.

Swirling flow, swirling flow core, water ring of swirling flow, flow swirling parameter, geometric parameter of flow swirler, air entrapment, air content, criteria of similarity, aeration shaft.

При проектировании водосбросных и сопрягающих сооружений, работающих в условиях пропуска закрученных потоков, не всегда в полной мере можно применять известные методики гидравлического расчета параметров закрученного потока [1, 2, 3 и др.]. Многообразие конструкций вихревых водопропускных сооружений (водосбросов, сопрягающих напорных сооружений, ливне-спусков и проч.) и условий их работы вынуждает прибегать к физическому моделированию рассматриваемых сооружений.

Закрученный поток создается так называемыми «закручивающими устройствами». Наиболее простой конструкцией является тангенциальный завихритель потока [4 и др.]. Тангенциальный завихритель потока применен в вихревых

водосбросах гидроузла Тери (Индия) и Компоса (КНР), а также предлагался для внедрения на Туполангском (Узбекистан), Рогунском (Таджикистан), Тельмамском (РФ) и Лидзяся (КНР) гидроузлах.

Основными критериями подобия в моделировании закрученных потоков являются: $Fr = idem$, $Eu = idem$ и $Re = idem$. Дополнительно для гидродинамического подобия требуется также соблюдение геометрической пропорциональности потока [1]:

$$r_{я} / R = idem, \quad (1)$$

где $r_{я}$ – радиус ядра потока; R – радиус потока;

$$Eu = p_{я} / \rho \varphi^2 2gH = \chi_{я} / 2\varphi^2, \quad (2)$$

где $p_{я}$ – давление в ядре; $\chi_{я}$ – относительное давление (вакуум) в ядре.

Следовательно, $\chi_{я} = idem$ [1].

В высоконапорных модельных установках (они очень дорогие, применялись для исследований водосброса с вихревым затвором [3]) скорости потока достигают натурных значений, в этом случае движение потока автомодельно по критерию Фруда. Таким образом, критерии подобия для случая стационарного осесимметричного закрученного течения вязкой несжимаемой жидкости в водоводе круглого поперечного сечения (цилиндрическая труба) следующие:

$$\begin{cases} Eu = idem; & Re > Re_{кр}, \\ r_{я}/R = idem; & \chi_{я} = idem \end{cases} \quad (3)$$

$$и A_r = idem, \quad (4)$$

где $A_r = U_0/\omega \bar{v}$ – гидравлическая характеристика закрученного потока (здесь U_0 – окружная составляющая местной скорости потока вблизи стенки; ω – относительная площадь водяного кольца закрученного потока; \bar{v} – средняя скорость потока).

Моделирование сооружения, работающего в условиях пропуска закрученного потока, отлично от моделирования «чисто» закрученного потока в цилиндрической трубе. Например, для моделирования вихревых водосбросов предъявляются те же требования, что и для моделирования традиционных водосбросных сооружений, т. е. при соблюдении автомодельности рассматриваемых явлений по критерию Рейнольдса должны выполняться равенства чисел Фруда, Струхала и Эйлера на модели и натуре:

$$Fr = v_m^2/gR = idem; \quad (5)$$

$$St = R/v_m T = idem; \quad (6)$$

$$Eu = p/\rho v_m^2 = idem, \quad (7)$$

где v_m – осевая скорость потока; R – радиус водовода (характерный линейный размер); p – давление в произвольной точке потока [5].

При установившемся режиме число Струхала не имеет значения и выпадает из подобия. Для закрученных потоков условие (7) может быть представлено в следующем виде [3]:

$$p^* = p/\rho gH. \quad (8)$$

Следует заметить, что давление p^* в воздушном ядре закрученного потока в общем случае не моделируется, так как его значение зависит от воздухосодержания потока, поступающего в отводящий водовод, которое может быть различным для модели и натуре. Однако можно полагать, что при минимальном воздухосодержании потока (допустим, случай пропуска расчетного расхода через шахтный вихревой водосброс, когда шахта затоплена и воздухозахват в ней отсутствует)

условие (8) будет выполняться, если вакуум в ядре закрученного потока, пересчитанный в натуре, не будет превосходить своего максимального физического значения.

Регулирование движения в воздушном ядре осуществляется путем устройства вентиляционного отверстия в торце узла закрутки, соединенного с аэрационной шахтой (так было сделано на вихревых водосбросах гидроузла Тери в Индии). Однако при изменении давления в воздушном ядре изменяются его размеры и, следовательно, режим течения в отводящем водоводе. Поэтому модельные исследования желательнее проводить при нескольких значениях давления в ядре, для того чтобы иметь возможность выбрать требуемый вариант.

Дополнительным критерием подобия закрученных потоков является параметр

$$\Pi = \tau_u/\tau_0 = \sin \alpha_R, \quad (9)$$

где α_R – угол между направлением скорости потока у стенки водовода и осью водовода; τ_u, τ_0 – окружная и полная компоненты касательного напряжения у стенки водовода [1; 2].

Вследствие того что

$$\tau_u, \tau_0 = f(\lambda, v^2) \quad (10)$$

в автомодельной зоне, т. е. при условии равенства коэффициентов гидравлического трения модели и натуре ($\lambda = \lambda_1$), автоматически соблюдается условие

$$\Pi = idem, \quad (11)$$

если начальная закрутка потока $\Pi_0 = idem$.

Последнее условие выполняется при соблюдении геометрического подобия и равенстве геометрических параметров завихрителя потока натуре и модели: $A = A_1$.

В результате имеем, что для случаев, когда воздухозахват отсутствует, моделирование вихревых водосбросов может быть обеспечено по всем требуемым критериям.

Иначе обстоит дело с поступающим через шахту аэрированным потоком. На гидравлических моделях с внешним атмосферным давлением объемное содержание воздуха мало изменяется при перемещении потока вниз по стволу шахты к ключевому сечению тангенциального завихрителя потока, в то время как на натурном сооружении заземленный воздух при движении вниз обжимается увеличивающимся давлением жидкости. Так, для водосброса гидроузла Тери в Индии степень обжатия в натуре достигает 15-кратного значения, в то время как на открытой модели в масштабе 1:60 степень сжатия составляет 1,4... 1,5 (это на

порядок ниже натуральных значений) [5]. Кроме того, в опытах на моделях масштабов 1:25; 1:40 и 1:60 (исследования ОАО «НИИЭС», РУДН и МГМИ) отмечено возрастание углов закрутки потока в начальном сечении отводящего туннеля за тангенциальным завихрителем потока при уменьшении сбросных расходов и увеличении содержания воздуха в смеси. Поскольку на натурном объекте воздухосодержание в ключевом сечении тангенциального завихрителя шахтного водосброса всегда незначительно, то и возрастания углов закрутки при уменьшении сбросных расходов ожидать не приходится.

Выводы

В вихревых водосбросных сооружениях при отсутствии воздухозахвата моделирование обеспечивается по всем требуемым критериям подобия.

Для достоверного моделирования закрученного потока при наличии свободно-го уровня (например, в вертикальной или наклонной шахте водосброса до закручивающего устройства и при обильном воздухозахвате потоком) области воздуха в верхнем и нижнем бьефах необходимо изолировать от внешней атмосферы и снижать давление воздуха в этих областях (т. е. создавать вакуум) в соответствии с геометрическим масштабом модели.

1. Животовский Б. А. Водосбросные и сопрягающие сооружения с закруткой потока. – М.: Изд-во РУДН, 1995. – 190 с.

2. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справочное пособие / Д. Д. Лаппо [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.

3. Волшанник В. В., Зуйков А. Л., Мордасов А. П. Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 280 с.

4. Розанова Н. Н. Влияние конструкции тангенциального завихрителя на характеристики закрученного потока и пропускную способность водосброса // Гидротехническое строительство. – 1999. – №2. – С. 24–27.

5. Особенности вихревых туннельных водосбросов и гидравлические условия их работы / М. А. Галант [и др.] // Гидротехническое строительство. – 1995. – № 9. – С. 16–22.

Материал поступил в редакцию 10.06.13.

Розанова Нина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник

Тел. 8 (499) 976-24-60

E-mail: rozanovann4@mail.ru

УДК 502/504:624.042:627/626

В. П. ШАРКОВ, Б. М. БАХТИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ОБ УПРОЩЕННОЙ ФОРМУЛЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА-ЗАПОЛНИТЕЛЯ В ЯЧЕЙСТЫХ ГТС

Предлагается упрощенная формула для расчета вертикального давления грунта в ячейстых конструкциях гидротехнических сооружений. Предложенная методика расчета учитывает пространственный характер работы грунта и отличается приемлемой точностью.

Ячейка, заполнитель, осадки, вертикальное давление заполнителя, горизонтальное давление, статика.

The simplified formula for calculation of vertical pressure of soil in cellular constructions of hydraulic structures is proposed. This method of calculation takes into consideration a spatial character of soil work and is notable for its acceptable accuracy.

Cell, filler, precipitation, vertical pressure of filler, horizontal pressure, statics.

В ячейстых гидротехнических сооружениях вертикальное давление грунта-заполнителя на основании используют при

расчете их устойчивости или осадок ячейстого каркаса. В силосах это давление необходимо для расчета прочности днища.