

Моделирование водозаборного канала-ковша на р. Днепр для завода газетной бумаги в г. Шклове

Круглов Г.Г., Кунцевич Н.М., Линкевич Н.Н.

Белорусский национальный технический университет

Для обеспечения технической водой завода газетной бумаги в г. Шклове предполагается строительство ковшового водозабора. Однако отсутствие надежных рекомендаций по проектированию таких сооружений, необходимость детального изучения особенностей гидродинамического взаимодействия водоприемного канала-ковша с русловым потоком и разработки конструкции водозабора требуют проведения гидравлических исследований. В основу гидравлических исследований водозаборного канала-ковша положен метод физического моделирования [1], целью которого является воспроизведение в уменьшенном масштабе изучаемых явлений и обеспечения подобия натуральных и модельных явлений.

Для правильного воспроизведения одинаковой физической природы явлений должно обеспечиваться механическое подобие изучаемых явлений, т.е. их кинетическое и динамическое подобие, которое выражается в геометрическом подобии сопоставимых явлений и траекторий движения сходственных частиц жидкости, в сохранении одинаковой ориентации в пространстве границ потока, пропорциональности действующих в сходственных точках жидкости сил, постоянстве отношений плотности по всему полю течения. Это выражается в сохранении геометрического подобия форм, распределения скоростей, давлений и других физических констант. Геометрическое подобие реализуется легко, так как необходимо сделать только модель, подобную натуре. Значительно сложнее осуществить во всех частях модели подобие одноименных физических параметров, для которых требуется равенство своего критерия подобия.

В общем случае для моделей рассматриваемого типа необходимо удовлетворение следующим критериям:

$$\text{Sh} = \frac{Vt}{l} \text{ (Струхала)}, \text{Fr} = \frac{V^2}{gl} \text{ (Фруда)}, E = \frac{\rho V^2}{\rho} \text{ (Эйлера)},$$

$Re = \frac{IV}{\nu}$ (Рейнольдса). Здесь l – линейные размеры, V –

скорость течения воды, t – время, p – давление, g – ускорение свободного падения, ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости. Указанные критерии и условия подобия являются правилами моделирования, т.е. требованиями, которые необходимо выполнять при преобразовании гидродинамических процессов природы в процессы модели, чтобы получить линейное соответствие между их величинами. Для квазистационарных безнапорных течений, к которым относится исследование взаимодействия водозаборов с потоками, критерии Струхалея и Эйлера не являются определяющими и ими можно пренебречь [1]. Критерий Рейнольдса используется в качестве основного при моделировании движения потоков в напорных системах, когда преобладающими являются силы сопротивления.

При моделировании безнапорных потоков, характеризующихся наличием свободной поверхности воды, где движение происходит с преобладанием сил тяжести над силами сопротивления, определяющим является равенство критериев Фруда для модели и природы, т.е.

$$Fr = \frac{V_M^2}{g l_M} = \frac{V_N^2}{g l_N} = idem, \quad (1)$$

где V_M и V_N – средние скорости для сходственных живых сечений модели и природы; l_M и l_N – линейные размеры модели и природы.

При моделировании на основе гравитационного подобия необходимо также соблюдение условия автомодельности. Это выполняется для того, чтобы модель работала в квадратичной области сопротивления, где коэффициенты гидравлического трения не зависят от числа Рейнольдса.

$$Re = \frac{V_M l_M}{\nu} = \frac{V_N l_N}{\nu}, \quad (2)$$

где $\nu = \nu_M = \nu_N$ – кинематический коэффициент вязкости жидкостей на модели и в природе, которые принимаются одинаковыми, так как на модели и в природе используется одна жидкость.

При этом число Рейнольдса на модели сравнивается с критическим числом Рейнольдса $Re_{кр}$.

Для открытых потоков при равномерном движении

$$Re = \frac{VR}{\nu}, \quad (3)$$

где R – гидравлический радиус, равный $R = \frac{\omega}{\chi}$; ω – площадь живого сечения потока; χ – смоченный периметр.

Критическое значение числа Рейнольдса для открытых русел считается равным 800...900 и если выполняется условие

$$Re > Re_{кр}, \quad (4)$$

то условие автомодельности удовлетворяется.

Пересчет параметров с модели на натуру в этом случае будет вестись по зависимостям: линейных размеров $l_n = l_m \lambda$, площади $\omega_n = \omega_m \lambda^2$, уклонов $i_n = i_m$, скоростей $V_n = V_m \lambda^{0,5}$, расходов $Q_n = Q_m \lambda^{2,5}$, где λ – масштаб моделирования.

Кинематический коэффициент вязкости воды при средней ее температуре в лабораторных условиях 12°C равен $\nu = 0,0124$ см²/с. Масштаб моделирования λ выбирается максимально возможным, исходя из натуральных условий и возможностей лаборатории (плановых и высотных размеров русловой площадки, максимальной величины расхода лабораторной насосной установки и др.).

Для воспроизведения картины работы водозабора замоделирован участок реки Днепр и водозаборный канал-ковш с плановыми размерами 260x205 м. Глубина воды в реке изменяется в пределах 2,65...10,5 м, а расходы, проходящие по реке, – от 32 до 1580 м³/с. Размеры моделируемого участка р. Днепр и водозаборного канала-ковша, минимальные и максимальные глубины воды и расходы обусловили изготовление опытной установки на русловой площадке в масштабе 1:62.

С учетом масштаба моделирования минимальный и максимальный расходы на модели будут равны

$$Q_m^{\min} = \frac{32,0}{62^{2,5}} = 1,057 \text{ л/с}; \quad Q_m^{\max} = \frac{1580}{62^{2,5}} = 52,2 \text{ л/с}.$$

Глубины потока в реке на модели будут равны 2,58 см и 17,1 см.

Скорости $V_{\min}=4,55$ см/с, $V_{\max}=18,9$ см/с.

Тогда числа Рейнольдса на модели будут

$$Re^{\min} = \frac{4,55 \cdot 2,58}{0,0124} = 947; \quad Re^{\max} = \frac{18,9 \cdot 17,1}{0,0124} = 26064.$$

Следовательно, условие (4) соблюдается и удовлетворяется условие автомодельности.

При подборе материала для изготовления модели исходили из коэффициента шероховатости русла реки $n_n = 0,025 \dots 0,035$. Для геометрически подобной модели, которая в λ раз меньше натуре, коэффициент шероховатости модели n_m должен быть меньше в δ_m раз коэффициента шероховатости натуре.

$$n_m = \frac{n_n}{\delta_m}, \quad (5)$$

где $\delta_m = \delta^y$ – масштабный множитель коэффициента шероховатости; $\delta = \lambda$ – линейный масштабный множитель; y – показатель степени в формуле Н.Н. Павловского, который приблизительно можно определять по формуле

$$y = 1,3 \sqrt{n_n}. \quad (6)$$

Масштабный множитель $\delta = \lambda = 62$. Определение коэффициента шероховатости модели приведено в таблице 1.

Таблица 1

Определение коэффициента шероховатости модели

n_n	y	$\delta_m = \delta^y$	n_m
0,025	0,206	2,34	0,0107
0,035	0,187	2,16	0,0162

Таким образом, руслу реки на модели соответствует поверхность с коэффициентом шероховатости $n_m = 0,0107 \dots 0,0162$. Согласно [1] такая поверхность может быть изготовлена из хорошо заглаженного цементно-песчаного раствора. Конструкция модели водозаборного канала-ковша и верховой струенаправляющей дамбы выполнена в соответствии с представленными разработками Белкоммунпроекта. Схема водозаборного ковша приведена в работе [2]. Исследования проводились на пространственной модели участка р.Днепр, прилегающей территории с водозаборным ковшем, выполненной на русловой площадке Белорусского

национального технического университета при различных уровнях и расходах воды в реке.

На основании проведенных гидравлических исследований можно заключить, что запроектированные Белкоммунпроектом параметры ковшового водозабора: ширина по дну канала-ковша 10 м, заложение его откосов 1 : 2, отметка дна канала 141,2 м не требуют корректировки. В канале-ковше рекомендуется устройство шпунтовой стенки с отметкой гребня 148,0 м. Принятое в проекте местоположение шпунтовой стенки на расстоянии 21 м от подошвы торцевого откоса канала-ковша не требует изменения. Возможно смещение местоположения шпунтовой стенки относительно ее проектного положения влево или вправо на расстояние 2...3 м, что не оказывает существенного влияния на характер течений в канале-ковше.

Устройство струнаправляющей дамбы вызывает отклонение речного потока, а вместе с ним шуги и донных наносов, от входного сечения канала-ковша. Откосу дамбы желательно придать повышенную шероховатость устройством его крепления крупным камнем.

Малые скорости течения воды в канале-ковше будут неизбежно вызывать осаждение взвешенных наносов, что потребует периодических промывок (очистки) канала-ковша, а также способствуют раннему образованию в нем ледяного покрова, поэтому предполагается, что шуга, занесенная в канал-ковш из реки, будет всплывать и смерзаться с поверхностным льдом, что улучшит работу входных отверстий водозабора.

При прохождении в р. Днепр паводковых расходов более 600 м³/с отложившиеся на дне канала-ковша наносы от его входного сечения до шпунтовой стенки захватываются потоком и выносятся в русло реки, что подтверждает способность водозабора самопромываться.

Литература

1. Ляхтер, В.М., Прудовский, А.М. Гидравлическое моделирование. – М.: Энергоиздат, 1984. – 39 с.
2. Гидравлические исследования водозабора из р. Днепр для завода газетной бумаги в Шклове / Г.Г.Круглов, Н.М.Кунцевич, Н.Н.Линкевич //Вестник БНТУ. – 2005. - № 3 , с. 5...11.