

05.23.00 Строительство и архитектура

УДК 502/504:627.83

А. П. ГУРЬЕВ, Э. С. БЕГЛЯРОВА, А. В. ДМИТРИЕВА, С. А. СОКОЛОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

Р. А. ХАЙРУЛЛИН

Строительно-монтажное управление электромонтажных работ, г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРЯГАЮЩЕГО КОЛЕНА ШАХТНОГО ВОДОСБРОСА ПРИ БЕЗНАПОРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

В послевоенные годы резко возрос интерес к теоретическим исследованиям шахтного водосброса после появления работы Вагнера, посвященной исследованиям кольцевого водослива с острой кромкой. Методика некоторых аспектов гидравлических расчетов шахтных водосбросов включена в соответствующие «Рекомендации по гидравлическим расчетам» и гидравлические справочники. Тем не менее, до сих пор нет четко разработанных методик гидравлического расчета шахтных водосбросов как единого водосбросного сооружения, состоящего из водоприемной воронки, ствола и сопрягающего колена. Целью данных исследований являлась разработка методов расчета колена шахтного водосброса с полигональным поперечным сечением. В соответствии с поставленной целью в работе необходимо было решить следующие задачи: выполнить теоретическое обоснование геометрических параметров колена шахтного водосброса полигонального поперечного сечения; проанализировать теоретические основы расчета гидравлических параметров колена водосброса; экспериментально изучить работу шахтного водосброса полигонального поперечного сечения на физической модели; изучить распределение потерь энергии по глубине и ширине потока, определить значения коэффициентов сопротивления сопрягающего колена при безнапорном режиме его работы. Проведенные исследования позволили определить практическую ценность результатов экспериментов. Выполнены подробные модельные исследования шахтного водосброса полигонального поперечного сечения с 12-гранной водоприемной воронкой, позволившие получить распределение осредненного гидродинамического давления на вогнутую поверхность сопрягающего колена и кинематические характеристики потока при безнапорном режиме работы. Достоверность полученных результатов подтверждена результатами модельных исследований колена шахтного водосброса полигонального поперечного сечения в широком диапазоне гидравлических параметров и совпадением с ними данных теоретических расчетов.

Шахтный водосброс, сопрягающее колено, безнапорный режим, конфузор, расход, коэффициент гидравлического сопротивления, скорость потока, скоростной напор, гидравлический радиус, потери энергии.

Введение. Шахтные водосбросы относятся к поверхностным водосбросам. Их устраивают вне тела плотины при хороших геологических условиях и в водохранилищах при неблагоприятных геологических и топографических условиях расположения створа гидроузла.

Шахтные водосбросы служат постоянным эксплуатационным сооружением речных гидроузлов.

В состав шахтного водосброса входят: водосливная воронка с полным или неполным в плане кольцевым водосливом; переходной участок; вертикальная

шахта; конфузор, колено или иное сопрягающее устройство; отводящий водовод в виде трубы или туннеля.

Отличие сопрягающих колен шахтного водосброса от колен трубопроводов, сопрягающих участков сливных граней и водобоя водосливных плотин и их носков-трамплинов, состоит в том, что они имеют значительную высоту. На долю колена приходится значительная доля напора гидроузла, достигающая 30 %. Это обстоятельство создает условия для значительных деформаций потока в вертикальной плоскости в безнапорном сопрягающем колене от входного до выходного сечения.

Если для напорного гидравлического режима работы сопрягающего колена известны граничные условия на поверхности и дне потока (кривизна дна и потока колена), то при безнапорном режиме работы очертание свободной поверхности неизвестно.

Последнее обстоятельство затрудняет решение задачи распределения давления по длине водопропускного тракта, высоте выходного сечения конфузора, определению коэффициентов гидравлических сопротивлений сопрягающих колен, их размеров и требует модельных исследований водосброса по его пропускной способности.

Материалы и методы. Одной из задач исследований шахтного водосброса на модели масштаба 1:60 было определение коэффициентов гидравлических сопротивлений сопрягающих колен, выявление существующих расчетных зависимостей для аналитического определения величины коэффициента сопрягающего колена шахтного водосброса. Исследовалась безнапорная работа сопрягающего колена прямоугольного поперечного сечения шириной в свету $b=100$ мм (размер в плоскости, перпендикулярной настоящему листу), с углом поворота $88,7^\circ$. Радиус кривизны вогнутой грани сопрягающего колена составил 21,7 см, а центр ее кривизны располагался в плоскости входного сечения колена. Отводящий водовод был выполнен в виде туннеля коробчатого сечения с уклоном дна $i = 0,0225$ (рис. 1). На рисунке 1 представлена схема колена, сопрягающего ствол шахтного водосброса и отводящий водовод.

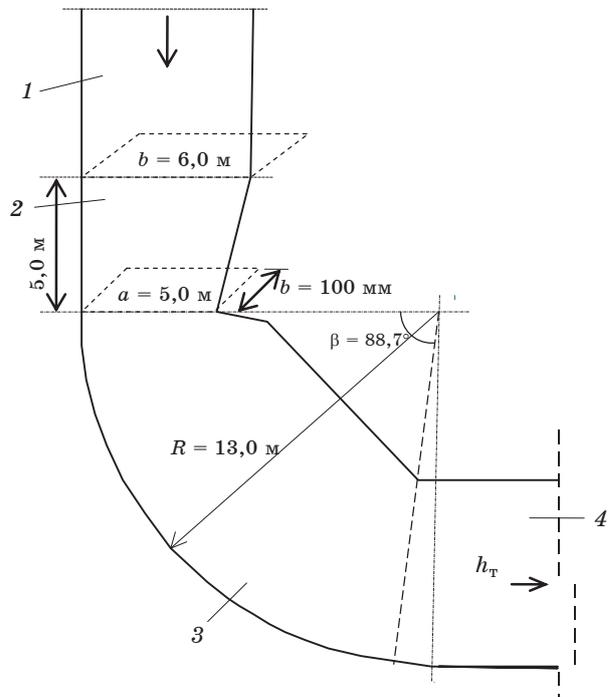


Рис. 1. Схема колена, сопрягающего ствол шахтного водосброса и отводящий водовод: 1 – ствол шахты; 2 – конфузор; 3 – колено прямоугольного сечения; 4 – отводящий водовод

Исследование сопрягающего колена в безнапорном режиме проводилось для трех вариантов размера выходного сечения конфузора $a = 56, 70$ и 76 мм при расходах модели $Q = 16,1; 21,1$ и $22,4$ л/с.

Потери напора в сопрягающем колене h_w определялись формулой Вейсбаха [1]:

$$h_w = \zeta_M \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

где ζ_M – коэффициент сопротивления колена; V – скорость за сопротивлением; $g = 9,81$ м²/с.

Коэффициент сопротивления сопрягающего колена ζ_M в опытах определялся как:

$$\zeta_M = \frac{2gdE_{ск}}{V^2},$$

где $dE_{ск}$ – величина гидравлических потерь (разность осредненных по сечению полных потерь энергии от верхнего бьефа до выходного сечения колена $E_{вых}$ и потерь энергии от верхнего до входного сечения колена $E_{вх}$):

$$dE_{ск} = E_{вых} - E_{вх}. \quad (3)$$

Поскольку в сопрягающем колене поток сильно искривлен, то появление центробежных сил вызывает сильную деформацию эпюры скоростей с

уменьшением их значения в пристенной области. Для получения суммарной величины гидравлических потерь в сопрягающем колене измерялись местные скорости и давления по площади поперечного сечения потока трубкой Пито. Динамическая трубка давала истинное значение энергии потока в измеряемой точке потока. По формуле (3) определялись местные величины потерь энергии и производилось построение соответствующих эпюр потерь энергии. Интегрирование этих эпюр позволяло определить суммарные потери для всего потока, после чего определялись осредненные удельные потери и по формуле (2). Более подробно методика эксперимента изложена ранее в работе [2].

Результаты и обсуждение. На рисунке 2 показано соответственно распределение осредненных скоростей по глубине и ширине потока на мерных вертикалях во входном и выходном сечениях сопрягающего колена, а также в туннеле при размерах выходного сечения конфузора 100x76 мм и расходе $Q = 22,4$ л/с.

На рисунках 4, 5 показано распределение местных потерь E_i энергии по глубине и ширине потока на мерных вертикалях во входном и выходном сечениях сопрягающего колена и в туннеле при размере выходного сечения конфузора b_{xh} , равного 100x76 мм и при расходе $Q = 22,4$ л/с. Так как потери энергии пропорциональны величине $V^2/2g$, то согласно рисунку 3 распределение потерь энергии по ширине будут иметь аналогичный вид.

В таблице приведены основные исследованные и рассчитанные параметры потока в сопрягающем колене.

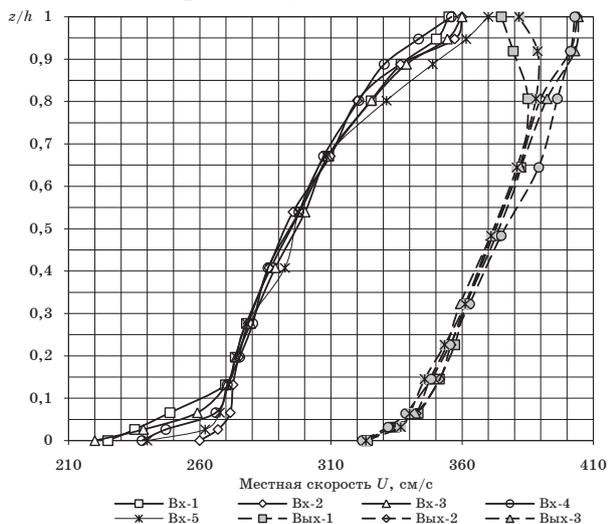


Рис. 2. Распределение скоростей по глубине потока на входе и выходе колена ($b = 100$ мм, $a = 76$ мм, $Q = 22,4$ л/с)

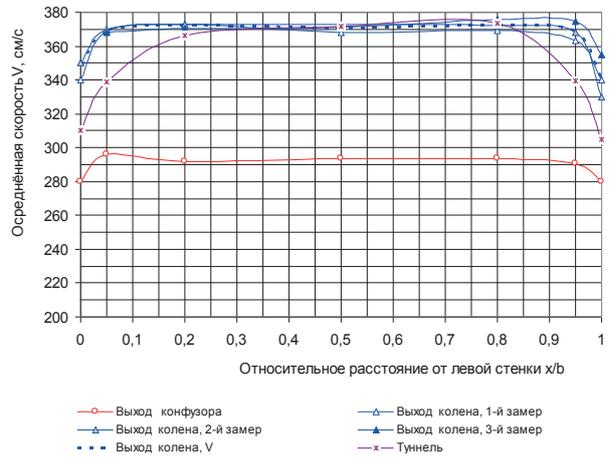


Рис. 3. Распределение осредненных скоростей по ширине потока во входном и выходном сечениях сопрягающего колена и в туннеле ($b = 100$ мм, $a = 76$ мм, $Q = 22,4$ л/с)

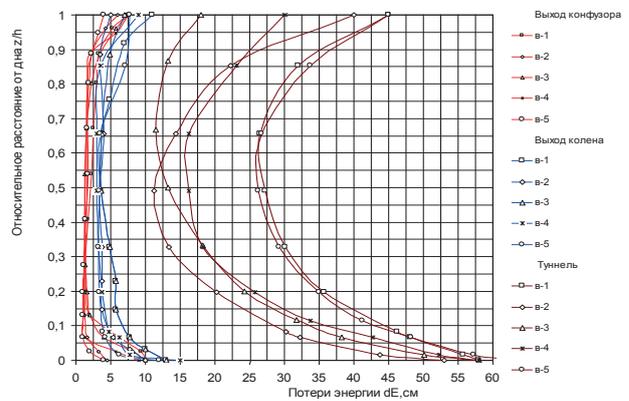


Рис. 4. Распределение потерь энергии по глубине потока во входном и выходном сечениях сопрягающего колена и в туннеле при безнапорном режиме работы

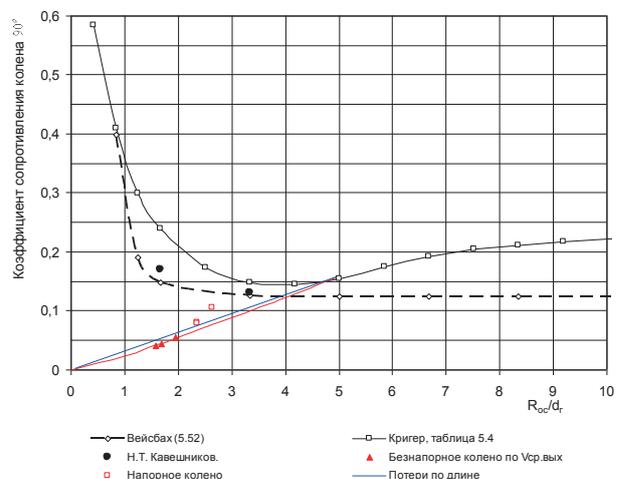


Рис. 5. Значения коэффициентов сопротивления сопрягающего колена при безнапорном режиме его работы как функции величины R_{oc}/d_r

Результаты исследования кинематики потока в сопрягающем колене прямоугольного поперечного сечения шахтного водосброса при безнапорном режиме

1	Размеры выходного сечения конфузора a , мм	56	70	76
2	Расход Q , л/с	16,06	21,06	22,42
3	Глубина потока на выходе из колена h , мм	41,0	54,0	60,0
4	Средняя глубина потока h_{cp} , мм	48,5	62,0	68,0
5	Потери энергии в колене h_w , см	4,21	3,40	2,89
6	Относительная глубина потока на выходе из колена h/a	0,732	0,771	0,789
7	Средняя скорость потока на входе в колено $V_{вх}$, см/с	286,8	300,9	295,0
8	Средняя скорость потока на выходе из колена $V_{вых}$, см/с	391,7	390,0	373,7
9	Скорость потока в среднем сечении колена V_{cp} , см/с	331,1	339,7	329,7
10	Гидравлический диаметр в выходном сечении колена $d_{г.вых} = 4R_{вых}$, см	9,01	10,38	10,91
11	Гидравлический диаметр в среднем сечении колена $d_{г.с} = 4R_c$, см	9,85	11,07	11,5
12	Число Рейнольдса в выходном сечении колена $Re_{вых}$	352960	405000	354436
13	Число Рейнольдса в среднем сечении колена Re_c	326058	376096	379155
14	Коэффициент сопротивления сопрягающего колена (относительно скоростного напора на выходе из колена) с исследованным углом поворота $88,7^\circ$	0,0538	0,0439	0,0406
15	Коэффициент сопротивления сопрягающего колена, пересчитанный на угол поворота 90°	0,0546	0,0445	0,0412
16	Средний радиус осевой линии потока R_{oc} , см	19,25	18,57	18,27
17	Длина осевой линии потока $l_{oc} = 1,57R_{oc}$, см	29,78	28,73	28,27
18	Относительная длина среднего радиуса осевой линии R_{oc}/d_r	1,95	1,68	1,59
19	Относительная длина осевой линии потока	3,06	2,64	2,5
20	Коэффициент Дарси по формуле А. Д. Альтшуля для среднего сечения	0,0206	0,02	0,0198
21	Коэффициент сопротивления по длине сопрягающего колена	0,063	0,0528	0,0494
22	Отношение п.14 к п.21	0,867	0,844	0,835
23	Разница расчетных значений потерь напора в колене по длине и по замерам по скорости на выходе, %	13,9	16,8	18,1

Экспериментально получены следующие коэффициенты сопротивления безнапорного колена: 0,0538, 0,0439 и 0,0406 соответственно для размеров выходного сечения конфузора $b = 100$ мм и $a = 56, 70$ и 76 мм (табл. 1).

Для сопрягающих колен, работающих в напорном режиме, исследователи считают целесообразным различать потери по длине колена и потери, связанные с деформацией потока [1]. Аналогичное разделение потерь интересно было бы сделать и для безнапорного сопрягающего колена шахтного водосброса.

В опытах глубина потока на выходе из сопрягающего колена находилась в пределах от 0,73 до 0,79 размера выходного сечения конфузора.

При исследованиях безнапорного режима в сопрягающем колене не наблюдалось каких-либо специфических деформаций потока, на которые потребовался бы дополнительный расход энергии потока. Считаем, что потери энергии безнапорного потока в сопрягающем колене должны определяться потерями по длине.

Для вычисления потерь по длине были также привлечены данные кинематических характеристик потока в отво-

дящем туннеле модели шахтного водосброса гидроузла Джедра, выполненные нами ранее [3], в створе, расположенном на расстоянии $l = 172$ см от выходного сечения сопрягающего колена. При безнапорном режиме работы распределение осредненных скоростей потока, потерь энергии по ширине и глубине изучалось для варианта конфузора с размерами выходного сечения $h = 100$ мм и $a = 76$ мм при расходе $Q = 22,4$ л/с.

По результатам исследований гидроузла Джедра и выражению (2) был определен коэффициент гидравлических потерь по длине:

$$\zeta_1 = \frac{2gdE_r}{V^2} = \frac{1962 \cdot 19,9}{358,4^2} = 0,304,$$

где 19,9 см – средневзвешенные потери энергии на участке между выходным сечением сопрягающего колена и мерным створом в туннеле; 358,4 см/с – средняя скорость потока в мерном створе туннеля.

Гидравлический радиус потока в мерном створе туннеля гидроузла Джедра был равен $R = 2,77$ см, ему соответствовал гидравлический диаметр $d_r = 4R = 11,07$ см, и относительная длина участка туннеля, на котором измерялись гидравлические потери энергии на трение,

составила $1/d_r = 172/11,07 = 15,54$. Тогда коэффициент гидравлического трения Дарси будет и число Рейнольдса будут равны:

$$\lambda = \frac{\zeta_r}{1/d_r} = \frac{0,304}{15,54} = 0,0196;$$

$$Re_d = \frac{Vd_r}{\nu} = \frac{358,3 \cdot 11,07}{0,01} = 396679.$$

Значения относительной шероховатости поверхности колена можно получить из формулы А. Д. Альтшуля [1]:

$$\lambda = 0,11 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta}{d_r} + \frac{68}{Re}}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент сопротивления по длине; Δ/d_r – относительная шероховатость стенок модели.

Из формулы (4) имеем величину абсолютной эквивалентной шероховатости модели водосброса (оргстекло):

$$\frac{\Delta}{d_r} = \left(\frac{\lambda}{0,11} \right)^4 - \frac{68}{Re},$$

где $\lambda = 0,0196$, $Re = 396679$.

Тогда $\Delta/d_r = 0,00084$ и величина шероховатости $\Delta = 0,00084 \cdot 110,7 \approx 0,1$ мм, что соответствует рекомендациям моделирования. Это значение $\Delta = 0,1$ мм принято при расчете гидравлических потерь по длине сопрягающего колена в таблице.

Следует отметить, что коэффициент всех потерь сопрягающего колена подсчитан по (4) относительно скорости в выходном сечении сопрягающего колена, а коэффициент потерь по длине сопрягающего колена подсчитан по скоростному напору в среднем сечении колена.

Сопоставление расчетных значений коэффициентов потерь по длине колена и экспериментальных значений приведено в последней строке таблицы. Коэффициент потерь сопрягающего колена, подсчитанный по скоростному напору в выходном сечении, получается меньше потерь по длине колена, подсчитанных по средней скорости и длине вогнутой поверхности колена, на 15,6...21,1 % (при уменьшении относительного среднего радиуса кривизны осевой линии потока с 1,95 до 1,59).

В инженерных курсах гидравлики рассматриваются потоки, в которых отсутствуют или пренебрежимо малы кривизна и сходимости линий тока. В реках, каналах эпюры распределения скоростей по сечению потока формируются на границах живого сечения за счет

вязкости воды и развития пограничного слоя. На рисунке 5 приведены значения коэффициентов сопротивления сопрягающего колена при безнапорном режиме его работы как функции величины R_{oc}/d_r .

В сопрягающем колене, как показано выше, центробежные силы могут превосходить гидростатическое давление в несколько раз, что и предопределяет скоростную структуру потока по вертикали. При этом придонные скорости могут снижаться до 0,7...0,8 от средней скорости потока, уже придонные скорости определяют величину гидравлических потерь на трение. Обработка результатов экспериментов позволила получить зависимость между потерями в сопрягающем колене и расчетными потерями по длине, определяемыми по средней скорости в сопрягающем колене.

В диапазоне значений относительной кривизны средней линии потока $1 < R_{oc}/d_r < 5$ для сопрягающих колена прямоугольного сечения может быть использована зависимость:

$$\xi_{кол} = 0,243 \cdot (R_{oc} / d_r)^{1,17} \quad (5)$$

При относительной длине радиуса кривизны $R_{oc}/d_r = 1,67$ коэффициент сопротивления колена по данным экспериментов почти в 4 раза, а при $R_{oc}/d_r = 3,34$ – в 1,3 раза меньше рекомендуемых (таблица).

Выводы

Рекомендации Кригера и Н. Т. Кавешникова [4] по определению коэффициента сопротивления безнапорных колена прямоугольного поперечного сечения не подтверждаются гидравлическими исследованиями.

Экспериментально полученные нами коэффициенты сопротивления сопрягающего колена прямоугольного поперечного сечения при безнапорном режиме работы меньше потерь по длине, за которую можно принимать длину средней линии потока в сопрягающем колене.

Относительная разница между действительными гидравлическими потерями в безнапорном сопрягающем колене и потерями по длине увеличивается с уменьшением относительной длины радиуса кривизны сопрягающего колена.

В предварительных расчетах безнапорного режима гидравлические сопротивления колена прямоугольного поперечного сечения в диапазоне относительной кривизны сопрягающего колена $R_{oc}/d_r = 2...3$ (таблица, рис. 5)

можно рассчитывать по зависимости (5).

Библиографический список

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

2. Гурьев А. П., Беглярова Э. С., Дмитриева А. В., Соколова С. А. Исследование сопрягающего колена шахтного водосброса при напорном режиме работы // Логистика, транспорт, природообустройство: материалы международной конференции. – Ереван: Арменпак, 2015. – 190 с.

3. Научное обоснование проектных решений шахтного водосброса гидроузла Джедра: Отчет НИР: Гос. регистрация № 01.20.03. 15976. – М.: МГУП, 2003.

4. Кавешников Н. Т. Гидравлические расчеты и проектирование шахтных водосбросов. – М.: Энергия, 1985. – 120 с.

Материал поступил в редакцию 07.09.2015.

Сведения об авторах

Гурьев Алим Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры комплексного использования водных ресур-

сов и гидравлики; ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19.

Беглярова Эвелина Суреновна, кандидат технических наук, профессор кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики; ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19.

Дмитриева Альбина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики; ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19.

Соколова Светлана Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики; ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19; тел.: 8(499)976-21-56; e-mail: sokolovasvetlana@mail.ru.

Хайруллин Ринат Аббясович, руководитель проектов; Строительно-монтажное управление электромонтажных работ; тел.: +7-926-123-16-13; e-mail: schmerzxxx@inbox.ru.

A. P. GURIEV, E. S. BEGLYAROVA, A. V. DMITRIEVA, S. A. SOKOLOVA

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow

R. A. KHAIRULLIN

The Construction management of electric installation works, Moscow

INVESTIGATION OF THE CONJUGATING KNEE OF A SHAFT SPILLWAY UNDER THE HEADLESS MODE OF OPERATION

In the postwar years the interest in theoretical researches of shaft spillway has increased after the appearance of Vagner's work devoted to investigations of the circular spillway with a sharp edge. Methodology of some aspects of hydraulic calculations of shaft spillways is included in the corresponding «Recommendations on hydraulic calculations» and hydraulic reference books. Nevertheless until now there are no clearly developed methods of hydraulic calculation of shaft spillways as a single spillway structure consisting of a water intake funnel, shaft and conjugating knee. The purpose of these investigations was a development of calculation methods of a spillway shaft knee with a polygonal cross section. In accordance with this purpose it was necessary to solve the following tasks in the work: to fulfill a theoretical substantiation of geometric parameters of the shaft spillway knee of a polygonal cross section; to analyze theoretical calculation foundations of hydraulic parameters of a spillway knee; to experimentally study the operation of the shaft spillway of a polygonal cross section on the physical model; to study the distribution of energy losses on the depth and width of the flow; to determine values of resistance coefficients of the conjugating knee under a headless mode of its operation. The fulfilled researches made it possible to determine a practical value of the experimental results. There were fulfilled detailed model investigations of the shaft spillway of a polygonal cross section with a 12-faced water intake funnel which allowed obtaining distribution of the averaged hydrodynamic pressure on the concaved surface of the conjugating knee and kinematic characteristics of the flow under a headless mode of operation. The reliability of the obtained results is confirmed by the results of model investigations of the shaft spillway knee of a polygonal cross section in a wide range of hydraulic parameters and coincidence with them by the data of theoretical calculations.

Shaft spillway, conjugating knee, headless mode, confuser, consumption, coefficient of hydraulic resistance, flow speed, high-speed pressure, hydraulic radius, energy losses.

References

1. **Idel'chik I. E.** Reference book on hydraulic resistances / Edited by M.O. Shteinberg. – M.: Machinebuilding, 1992. – 672 p.
2. **Guriev A. P., Beglyarova E. S., Dmitrieva A. V., Sokolova S. A.** Investigation of the conjugating knee of a shaft spillway under a head mode of operation // Logistics, transport, environmental engineering: materials of the international conference. – Yerevan: Armenpak, 2015. – 190 p.
3. Scientific substantiation of design solutions of shaft spillway of the unit Jedra: Report NIR: State registration № 01.20.03. 15976. – M.: MSUEE, 2003.
4. **Kaveshnikov N. T.** Hydraulic calculations and designing of shaft spillways. – M.: Energy, 1985. – 120 p.

Received on September 7, 2015.

Information about the authors

Gurjev Alim Petrovich, doctor of technical sciences, professor of the department of complex usage of water resources and hydraulics; FSBEI HE RSAU – MTAA; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 19.

Beglyarova Evelina Surenovna, candidate of technical sciences, professor of the department of complex usage of water resources and hydraulics; FSBEI HE RSAU – MTAA; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 19.

Sokolova Svetlana Anatoljevna, candidate of technical sciences, associate professor of the department of complex usage of water resources and hydraulics; FSBEI HERSAU – MTAA; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 19. tel.: 8(499)976-21-56; e-mail: sokolovasvetlana@mail.ru.

Khairullin Rinat Abbyasovich, manager of projects; The Construction management of electric installation works, tel.: +7-926-123-16-13; e-mail: schmerz@inbox.ru.

УДК 502/504:627.83

А. П. ГУРЬЕВ, Н. В. ХАНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

Н. А. МЕЗЕНЦЕВА

Акционерное общество «Институт Гидропроект», Москва

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ ГИДРОУЗЛОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ НАЛИЧИИ ГЛУБОКОГО ВАКУУМА

Статья посвящена анализу работы водосбросных сооружений при наличии глубокого вакуума. Приведены примеры водосбросных сооружений, при работе которых создаются условия для образования вакуума. Актуальность данной статьи заключается в том, что вопрос о влиянии вакуума на работу водосбросных сооружений остается открытым и недостаточно изученным. Авторами проделана большая работа по изучению модельных исследований водосбросных сооружений, проведенных различными учеными. Произведена оценка влияния вакуума на пропускную способность водосбросного сооружения. В статье рассмотрены сооружения, работающие при наличии глубокого вакуума. Представлены результаты модельных исследований вакуума. Дана оценка влияния глубокого вакуума на работу водосбросных сооружений. Все рассмотренные в статье сооружения обладают способностью образования вакуума, превосходящего физически возможную величину. Отмечается, что величина этого вакуума влияет на формирование суммарного напора водопропускного сооружения. Если не учитывать превышение вакуума над физически возможными модельными данными дают завышенное значение пропускной способности сооружения. Отмечается, что на моделях невозможно смоделировать режимы с глубоким вакуумом. Предложены способы повышения достоверности исследований вакуума с помощью моделей сооружений.

Вакуум, разрыв сплошности потока, пропускная способность.