

УДК 502/504:626.823:532.5

А.М. КУШЕР

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»), г. Москва

ГИДРОМЕТРИЧЕСКИЕ ЛОТКИ ДЛЯ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

В статье приведены критерии выбора гидрометрического лотка и представлены результаты расчета серии гидрометрических лотков критической глубины с минимальным подпором верхнего бьефа в земляных облицованных оросительных каналах с малыми уклонами. Рассмотрена возможность проектирования и приведен пример гидрометрического лотка, обеспечивающего минимальное заиливание верхнего бьефа. Приведенные данные доказывают применимость лотков критической глубины в оросительных каналах с малыми уклонами. В качестве инструментария использованы разработанный программный комплекс на основе численного решения системы уравнений Навье-Стокса в трехмерной постановке и программный комплекс анализа и расчета гидрометрических лотков по методу M.G. Vos'a. По результатам лабораторных и натурных экспериментов погрешность расчета расходной зависимости не превышала 2...4%. Учитывая универсальность метода, разработанный инструментарий можно использовать для проектирования широкого круга гидрометрических конструкций, а также для повторной калибровки существующих гидрометрических сооружений, в том числе построенных с нарушением трудно выполнимых требований стандартов. Параметры гидрометрических лотков, вычисленные с помощью разработанного математического обеспечения, предельно точно учитывают поставленные требования и одновременно – геометрические и гидравлические характеристики оросительных каналов. Приведенные расчетные данные доказывают применимость лотков критической глубины в оросительных каналах с малыми уклонами.

Гидрометрия, гидрометрическое сооружение, гидрометрический лоток критической глубины, расходная зависимость, точность измерений.

Введение. В мировой практике для измерения расходов воды в оросительных каналах широко применяются гидрометрические сооружения (конструкции). За исключением сооружений типа «Фиксированное русло», имеющих низкую достоверность измерений, принцип работы гидрометрических конструкций основан на трансформации режима течения от спокойного (докритического) в сверхкритический, и далее – обратно в докритический в отводящем канале. Структура потока в большинстве таких сооружений имеет трехмерный характер. Кроме того, на участках криволинейного течения профиль давления отличается от гидростатического распределения, свойственного равномерному и медленно изменяющемуся потоку.

В большинстве случаев расходные характеристики таких конструкций получены на основе предварительных экспериментальных исследований на моделях сооружений. Для получения декларируемой точности измерений необходимо строгое соблюдение условий модельных исследований, что не всегда осуществимо из-за отсутствия необходимой информации.

Водосливы с тонкой стенкой вызывают наибольший подпор верхнего бьефа и могут

применяться только в каналах с большим запасом строительной глубины и низким содержанием взвешенных наносов. Недостатком лотков Паршалла, лотков САНИИРИ, водосливов с широким прямоугольным порогом и большинства других является низкий коэффициент предельного затопления ($S < 0,5 \dots 0,6$), что делает невозможным выполнение точных измерений в типичном для оросительных каналов подпорно-переменном режиме. Кроме того, как показали последние исследования с применением современных средств измерений, расходные характеристики ряда типоразмеров лотков Паршалла отличаются от стандартной степенной зависимости, а погрешность измерений существенно превышает декларируемую точность 5% [1].

Наиболее совершенными с точки зрения взаимовлияния сооружения и канала являются лотки критической глубины. Их отличают малый подпор верхнего бьефа, высокий коэффициент предельного затопления (при оптимальном выборе) и отсутствие необходимости калибровки перед началом эксплуатации. В отличие от большинства конструкций с вертикальными передними стенками лотки критической глубины могут применяться в каналах с малым запасом по глубине

и (или) малым продольным уклоном. Обычно значения уклона оросительных каналов находятся в диапазоне $I = 0,00005 \dots 0,0005$.

В документе ISO 4359 стандартизован полуэмпирический метод расчета лотков с трапециевидальной и U-образной формой поперечного сечения горловины [4]. В принятой модели течения присутствуют коэффициенты и аналитические зависимости нефизического происхождения, полученные, очевидно, при обработке экспериментальных данных, что делает невозможным применение этой модели для гидрометрических лотков другой формы. Результаты численного и физического моделирования гидрометрических лотков не подтверждают принятую в стандартном методе гипотезу идентичности структуры потоков на плоской пластине и в горловине лотка критической глубины.

Результаты расчетов и анализа. В работе представлены потенциальные возможности и результаты расчета гидрометрических лотков критической глубины с наиболее важными гидрометрическими и эксплуатационными параметрами. В качестве инструментария для исследования лотков критической глубины использованы разработанные в ГБНУ ВНИИГиМ программный комплекс на основе решения системы уравнений движения Навье-Стокса, уравнений неразрывности и VOF (Volume-Of-Fluid) в трехмерной постановке и программный комплекс анализа и расчета гидрометрических лотков по методу Vos'a [5, 6]. Для обеспечения предельной точности гидравлический расчет выполняется на структурированной сетке. Предыстория потока учитывается вновь разработанным входным краевым условием «Глубина – форма профиля скорости».

Течение в гидрометрическом лотке определяется структурной трансформацией потока и зависит от формы сооружения, длины горловины, напора, величины и профиля скорости в подводящем канале. Как следует из теории пограничного слоя, толщина слоя в конфузоре (в данном случае это секция сопряжения с подводящим каналом) уменьшается за счет градиента давления в продольном направлении. Структура потока в горловине практически полностью определяется геометрией внешних границ потока. Как показали исследования, поле скоростей и расходная характеристика гидрометрического лотка критической глубины слабо зависят от шероховатости стенок. Преобладающим фактором, определяющим гидравлические и метрологические параметры, является форма попе-

речного сечения контрольной секции (горловины). По результатам наших исследований второй по значимости влияния на точность измерений является форма профиля скоростей в подводящем канале, что учтено при разработке программного обеспечения [5, 7].

Важнейшими характеристиками гидрометрического лотка являются:

- минимальный подпор верхнего бьефа на максимальном расходе. Нижняя граница подпора определяется условием свободного истечения на выходе лотка, а верхняя – предельной глубиной воды в подводящем канале на максимальном расходе;

- минимальное изменение режима потока в верхнем бьефе, вызывающего осаждение взвешенных наносов, что особенно проявляется на малых расходах (скоростях потока);

- максимальный диапазон измеряемых расходов при заданном диапазоне напоров в верхнем бьефе (если изначально не задан). Максимально допустимый напор зависит от принятого запаса по глубине в подводящем канале. Для предотвращения переполнения канала, например, из-за изменчивости шероховатости стенок подводящего канала, отложения наносов или влияния растительности, величина коэффициента запаса по глубине принята равной 10...20%.

В таблицах 1, 2 представлены вычисленные параметры серии трапециевидальных лотков критической глубины с минимальным подпором верхнего бьефа в земляном ($n = 0,030$) и облицованном ($n = 0,015$) трапециевидальном канале с уклоном $I = 0,00005$ и $I = 0,0005$. Параметры типичной геометрии оросительных каналов взяты из [8].

Здесь B_c – ширина канала по дну; m_c – коэффициент откоса канала; h_c – строительная глубина канала; L_{con} – длина входной секции лотка (секции сжатия потока); L_t – длина контрольной секции (горловины); L_{div} – сокращенная длина выходной секции (рис. 2); B_t – ширина трапециевидальной горловины по дну; m_t – коэффициент откоса трапециевидальной горловины; p_t – высота порога (разность уровней дна подводящего канала и горловины); Q_{min} и Q_{max} – границы диапазона измеряемых расходов; d_{min} и d_{max} – величина подпора верхнего бьефа на границах диапазона расходов; a, b, c, d – коэффициенты степенного полинома, аппроксимирующего расходную кривую $Q = a + b \cdot h + c \cdot h^d$, где Q – расход воды, куб. см/с, h – геометрический напор, см; σ – среднеквадратическое отличие расчетных и аппроксимированных значений расхода.

**Геометрические и гидравлические параметры
трапецеидальных лотков критической глубины с минимальным подпором
верхнего бьефа в трапецеидальном облицованном канале ($n = 0,015$)
с уклоном $I = 0,00005$ и $I = 0,0005$**

N	1	2	3	...	18	19	20
Геометрия поперечного сечения канала							
B_c , м	0,4	0,4	0,4	...	1,5	1,5	1,5
m_c	1,0	1,0	1,5	...	1,5	2,0	2,0
H_c , м	0,35	1,5	0,5	...	3,0	1,5	3,0
Параметры лотка в канале с уклоном $I = 0,00005$							
$L_{con} \times 10^2$, м	60,581	193,19	78,346	...	494,776	454,09	417,38
$L_t \times 10^2$, м	20,1	97,6	29,5	...	218,9	124,0	159,0
$L_{div} \times 10^2$, м	61,2	191,6	83,2	...	529,9	456,3	432,0
$B_t \times 10^2$, м	4,667	0	0	...	0	0	140,4
m_t	2,633	1,280	3,0575	...	1,915	2,046	3,733
$p_t \times 10^2$ м	15	57	21	...	99	40	138
$Q_{min} \times 10^3$, м ³ /с	2,6	4,6	2,1	...	18,8	7,2	96,7
$Q_{max} \times 10^3$, м ³ /с	24,0	505,3	61,5	...	5718,5	1472,5	7367,5
$d_{min} \times 10^2$, м	12,3	56,3	19,5	...	103,2	43,7	121,0
$d_{max} \times 10^2$, м	1,4	6,5	1,9	...	13,7	8,0	10,8
a	-308,6	0	-261,5	...	0	-155,7	0
b	207,8	12,89	81,32	...	43,3	21,52	6173
c	32,09	12,87	30,74	...	18,03	20,54	147,1
d	2,538	2,553	2,574	...	2,559	2,551	2,32
σ , %	0,03	0,15	0,10	...	0,46	0,19	0,41
Параметры лотков в канале с уклоном $I = 0,0005$							
$L_{con} \times 10^2$, м	36,615	106,26	43,0	...	164,77	94,36	159,86
$L_t \times 10^2$, м	37,5	152,2	53,5	...	326,0	150,7	318,5
$L_{div} \times 10^2$, м	36,45	105,4	42,6	...	179,3	93,3	159,2
$B_t \times 10^2$, м	7,350	0	0	...	108,0	122,3	100,2
m_t	1,683	1,360	2,184	...	1,630	2,573	2,460
$p_t \times 10^2$ м	4,5	25	6,5	...	40	28	46
$Q_{min} \times 10^3$, м ³ /с	2,5	5,4	1,5	...	224,6	75,0	222,5
$Q_{max} \times 10^3$, м ³ /с	75,8	1631,0	193,8	...	18567,0	4916,0	23511,8
$d_{min} \times 10^2$, м	5,8	29,7	8,8	...	38,5	25,9	44,7
$d_{max} \times 10^2$, м	1,4	5,5	1,9	...	11,1	5,1	9,9
a	-35,78	1249	-1046	...	0	0	0
b	233	49,86	274,7	...	7002	5377	7108
c	25,04	9,108	13,62	...	48,8	109,5	37,52
d	2,515	2,655	2,711	...	2,41	2,345	2,522
σ , %	0,20	0,5	0,55	...	0,40	0,46	0,46

**Геометрические и гидравлические параметры
трапецеидальных лотков критической глубины с минимальным подпором
верхнего бьефа в трапецеидальном необлицованном канале ($n=0,030$)
с уклоном $I = 0,00005$ и $I = 0,0005$**

N	1	2	3	...	18	19	20
Геометрия поперечного сечения канала							
B_c , м	0,4	0,4	0,4	...	1,5	1,5	1,5
m_c	1,0	1,0	1,5	...	1,5	2,0	2,0
H_c , м	0,35	1,5	0,5	...	3,0	1,5	3,0
Параметры лотка в канале с уклоном $I = 0,00005$							
$L_{con} \times 10^2$, м	103,37	344,84	164,0	...	1065,6	600,32	1229,43
$L_t \times 10^2$, м	20,048	129,47	30,841	...	292,95	98,76	234,49
$L_{div} \times 10^2$, м	101,15	307,03	161,17	...	936,157	592,28	1131,27
$B_t \times 10^2$, м	7	0	0	...	0	0	0
m_t	0,7725	0,2982	1,2667	...	0,42	1,7952	0,9552
$p_t \times 10^2$ м	15	36	20	...	50	56	88
$Q_{min} \times 10^3$, м ³ /с	1,7958	0,816	4,96	...	7,03	6,62	10,88
$Q_{max} \times 10^3$, м ³ /с	11,208	225,37	28,497	...	2519,42	733,82	3370,54
$d_{min} \times 10^2$, м	10,77	40,23	14,65	...	61,70	56,84	92,34
$d_{max} \times 10^2$, м	2,32	12,0	3,21	...	26,09	8,16	19,36
a	1	1	1	...	1	1	1
b	127,5	-24,87	-3,162	...	-133,3	-11,46	-103,9
c	33,66	2,558	15,25	...	4,02	20,07	10,35
d	2,202	2,572	2,515	...	2,546	2,527	2,528
σ , %	0,029	0,50	0,01	...	0,41	0,03	0,03
Параметры лотков в канале с уклоном $I = 0,0005$							
$L_{con} \times 10^2$, м	50,225	171,07	64,850	...	578,08	226,58	734,77
$L_t \times 10^2$, м	23,417	127,64	38,962	...	312,22	131,49	306,12
$L_{div} \times 10^2$, м	50,22	171,65	75,907	...	544,31	267,75	686,97
$B_t \times 10^2$, м	17,6	0	0	...	0	0	0
m_t	1,82	1,0119	2,3524	...	1,2115	2,8509	1,582
$p_t \times 10^2$ м	13	38	15	...	40	36	44
$Q_{min} \times 10^3$, м ³ /с	4,47	3,52	1,596	...	28,92	10,28	36,50
$Q_{max} \times 10^3$, м ³ /с	37,49	783,08	95,185	...	8796,91	2392,3	10949,4
$d_{min} \times 10^2$, м	9,98	40,95	15,74	...	50,97	40,07	52,90
$d_{max} \times 10^2$, м	1,55	7,48	2,25	...	16,47	6,56	16,80
a	1	1	1	...	1	1	1
b	374,2	16,96	18,98	...	-13,7	208,6	5,855
c	68,63	9,557	25,0	...	11,17	24,35	14,7
d	2,267	2,567	2,56	...	2,562	2,593	2,562
σ , %	0,10	0,32	0,14	...	0,09	0,78	0,21

Изменение режима течения в верхнем бьефе после установки гидрометрического сооружения вызывает осаждение взвешенных наносов, что особенно проявляется на малых расходах (скоростях потока). Минимальное влияние гидрометрического сооружения на гидравлику потока в подводящем канале имеет место при максимальном совпадении их расходных характеристик. Проведенный

анализ показал возможность расчета лотка как трапецидальной, так и параболической формы, отвечающего данному условию. Число таких конструкций не превышает нескольких процентов от общего числа возможных вариантов. На рисунке 1 приведены параметры гидрометрического лотка, вычисленного по критерию минимального заиления подводящего канала.

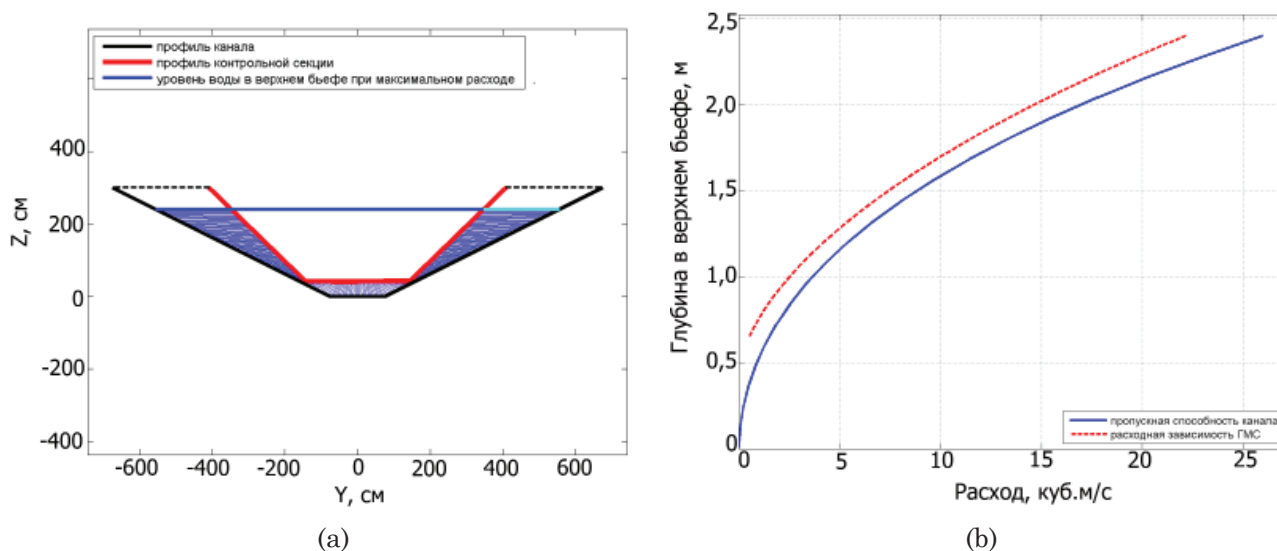


Рис. 1. Гидрометрический лоток критической глубины для минимального заиления подводящего канала: а – геометрия поперечного сечения; б – расходная характеристика. Канал: $B_c = 1,5$ м; $m_c = 2$; $I_c = 0,0005$; $n = 0,015$. Гидрометрический лоток: $B_t = 2,862$ м; $m_c = 1,0308$; $p_t = 0,42$ м

Помимо гидравлических параметров, при расчете оптимальной геометрии гидрометрического лотка предусмотрены метрологические и конструкционные критерии. Это, в частности, – линейность расходной зависимости $Q = f(h_{вв})$ и её крутизна на отдельных участках кривой расхода, что необходимо для повышения точности отсчета уровня воды уровнемерами надводного и подводного типов, а также максимальный диапазон измерений (если не заданы требуемые границы). Конструкционные критерии служат для оценки необходимости фундамента (для оценки веса вычисляется объем сооружения в существующем канале) и упрощения технологии строительства (вычисляются конструкции с заданными геометрическими параметрами). Для облегчения проектирования в математическом обеспечении предусмотрен расчет сложной геометрии участков сопряжения лотка с каналом. Расчет конструкции, оптимальной по нескольким параметрам, может выполняться по двум алгоритмам:

на основе максимального критерия и методом ранжирования.

Простейшим вариантом реализации лотка критической глубины в небольших каналах является лоток с цилиндрической горловиной. На рисунке 2 приведены характеристики цилиндрического лотка в трапецидальном канале ($B_c = 0,4$ м; $m_c = 1$; $I_c = 0,0005$). Внутренний диаметр горловины лотка – 0,5 м.

Достоверность расчета гидрометрических лотков проверялась по данным лабораторных и натурных измерений. Различие экспериментальных и расчетных значений расхода не превышало 1...2% [5, 7]. Лабораторные эксперименты показали, что значения коэффициента предельного затопления могут достигать значений 0,9...0,95, что существенно превышает рекомендуемые (например, в МИ 2406-97) значения $S_{max} = 0,7...0,75$. Кроме того, обязательно стандартное требование наличия входных закруглены закрывков. Главным условием является безотрывный вход потока в горловину для сокращения

потерь кинетической энергии. Это условие соблюдается при $L_{\text{con}}/d_B = 2...3$ (d_B – максимальная разность значений ширины подводящего канала и горловины) на пре-

дельной глубине в верхнем бьефе. Результаты исследований учтены при разработке программного обеспечения (голубая линия – на рисунке 1а).

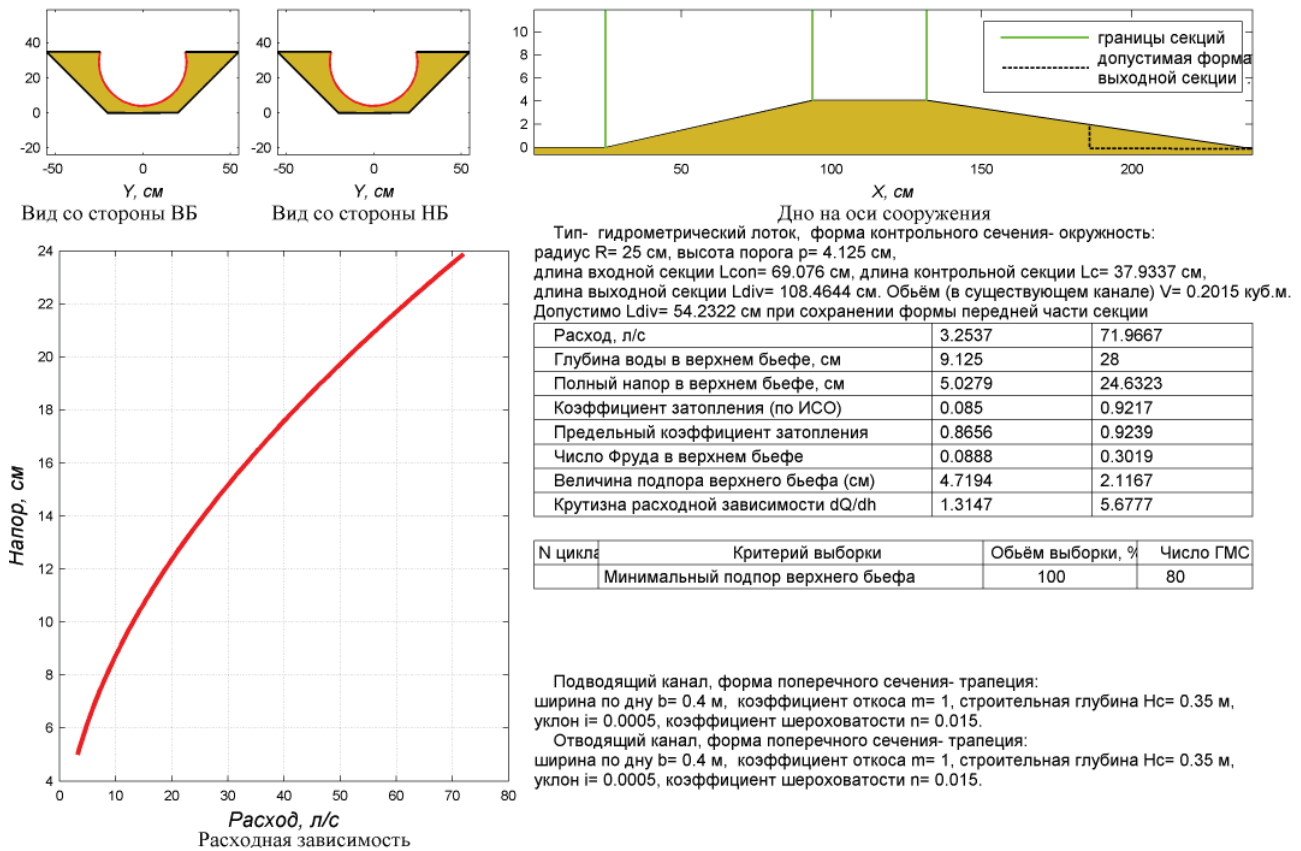


Рис. 2. Результаты расчета цилиндрического лотка критической глубины

Натурные исследования проведены на лотке критической глубины с расходом до 5 м³/с, спроектированным с участием ВНИИГиМ и построенном в Дагестане на участке Карабудахкентского УОС канала Октябрьской революции (рис. 3) [9]. Параметры канала и лотка составляют: $B_c = 1,7$ м; $m_c = 2$; $H_c = 2,4$ м; $B_t = 0,62$ м; $m_t = 0,8$; $p_t = 0,2$ м; $L_{\text{con}} = 4,5$ м; $L_t = 2,9$ м; $L_{\text{div}} = 9,5$ м (L_{con} , L_t , L_{div} – длина входной секции, горловины и выходной секции соответственно).

Измерения расхода воды выполнялись методом «Скорость-площадь» с применением гидрометрической вертушки ГМЦМ Микро-01. Геометрический напор $h = 0,7$ м. Расчет общего расхода выполнялся 2 способами: а) суммированием расходов в отдельных отсеках с центром в точке расположения измерителя ($Q_1 = 1,023$ м³/с) и б) по средним скоростям на вертикалях согласно МИ 1759-87 ($Q_2 = 0,995$ м³/с).

По результатам численного моделирования потока в гидрометрическом лотке с геометрией натурального объекта различие

экспериментального и расчетного расходов составило $\delta_{Q1} = 4\%$, $\delta_{Q2} = 1,4\%$. Показанные на рисунке 4 эпюры скорости и профиль свободной поверхности – интерполяция трехмерной структуры потока на вертикальную плоскость вдоль оси канала (XOZ).



Рис. 3. Опытный образец гидрометрического лотка критической глубины на канале КОР в Дагестане

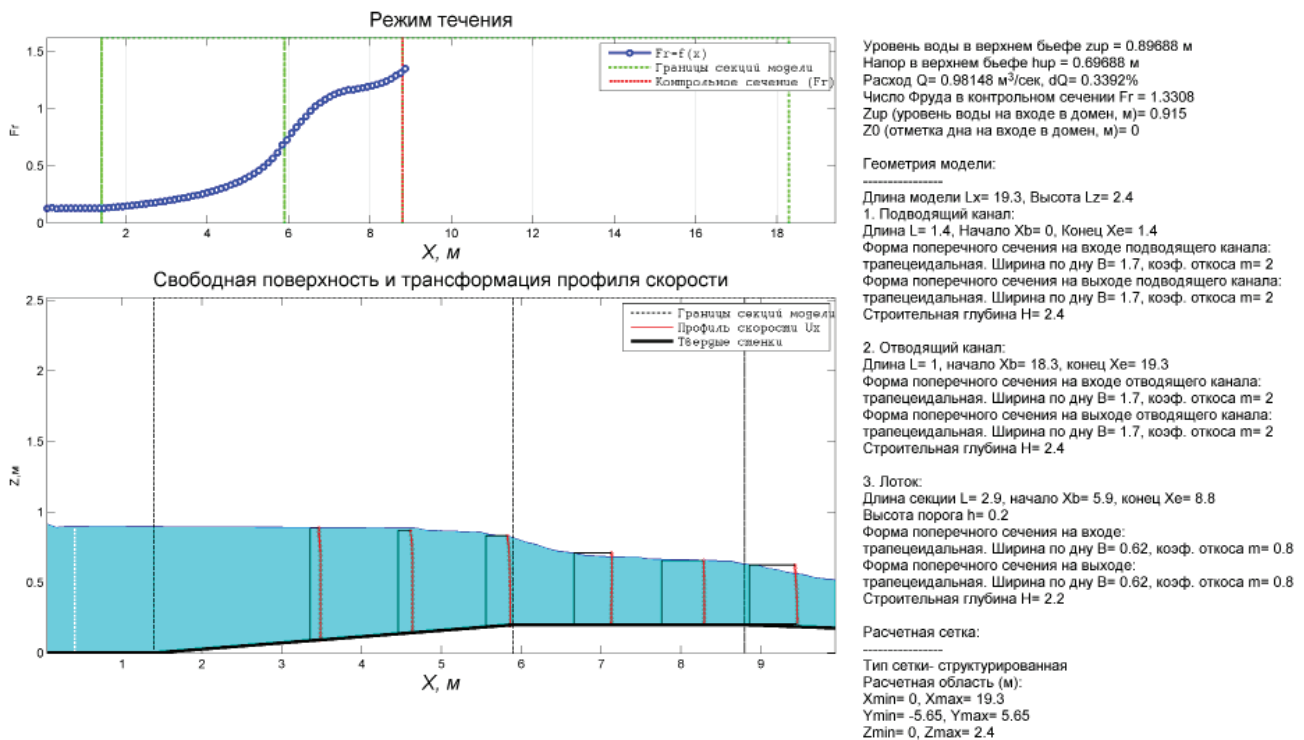


Рис. 4. Результаты численного расчета гидрометрического лотка на канале КОР

Выводы

Параметры гидрометрических лотков, вычисленные с помощью разработанного математического обеспечения, предельно точно учитывают поставленные требования, и одновременно – геометрические и гидравлические характеристики оросительных каналов.

Приведенные расчетные данные доказывают применимость лотков критической глубины в оросительных каналах с малыми уклонами.

Учитывая универсальность метода, разработанный инструментарий можно использовать для проектирования широкого круга гидрометрических конструкций, а также для повторной калибровки существующих гидрометрических сооружений, в том числе построенных с нарушением часто трудно выполнимых требований стандартов.

Библиографический список

1. Steven J. Wright, Blake P. Tullis, Tamara M. Long. Recalibration of Parshall flumes at low discharges. *J. Irrigation and Drainage Engineering*. 1994; 120(2):348-362.
2. Ackers P., White W.R., Perkins T.A., Harrison A.J. *Weirs and Flumes for Flow Measurement*. Chichester-New York-Brisbane-Toronto, John Wiley and Sons, 1978.
3. Bos M.G., Replogle S.A., Clemmens A.J. *Flow Measuring Flumes in Open Channel Systems*. Chichester-New York-Bris-

bane-Toronto-Singapore, John Wiley and Sons, 1984.

4. ISO 4359 «Liquid flow measurement in open channels – Rectangular trapezoidal and U-shaped flumes». – Geneva, ISO, 1980. Ревизия: ISO 4359:2013.

5. Кушер А.М. Разработать метод и компьютерную технологию расчета гидрометрических лотков, НТО. – М.: ГНУ ВНИИГиМ, 2011.

6. Кушер А.М. Расчет и выбор конструкции гидрометрического лотка на каналах водохозяйственных систем // *Материалы Международной научно-практ. конференции «Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения»*. Ч. 4: Водные объекты: состояние, проблемы и пути их решения». – М.: МГУП, 2011. – С. 176-183.

7. Кушер А.М. Исследование гидрометрических лотков с длинной горловиной численным методом // *Мелиорация и окружающая среда: Юбилейный сб. научных трудов*. Т. 2 / ВНИИГиМ. – М.: ВНИИГиМ, 2004. – С. 105-115.

8. Филиппов Е.Г. *Гидравлика гидрометрических сооружений для открытых потоков*. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 24 с.

9. Разработать теорию гидравлики гидрометрических сооружений и технологии водоучета на мелиоративных системах. НТО. – М.: ВНИИГиМ, 2004.

Материал поступил в редакцию 31.03.2016 г.

Сведения об авторе

Кушер Анатолий Михайлович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Ко-

стякова», 127550, г. Москва, ул. Б. Академическая, 44; тел.: 8(499)154-52-09; e-mail: esongamk@pochtamt.ru

A.M. KUSHER

The All-Russian research institute of hydraulic engineering and land reclamation named after A.N. Kostyakov (FSBRI «VNIIGiM named after A.N. Kostyakov»), Moscow

FLOW-MEASURING FLUMES FOR IRRIGATION CANALS

The hydrometric structures (devices) are widely used in the world to measure flow rate in irrigation canals. The critical depth flumes are the best ones from the point of view of interdependence of a channel and flow-measuring structure. They have a small backwater, a high submergence limit (at the optimal choice) and don't require initial calibration.

In the article there are given criteria of choice of a flow-measuring flume and calculation results of hydrometrical flumes series of critical depth with a minimal backwater upstream in earth and lined channels with small inclinations. There is considered a possibility of designing and is given an example of a flow-measuring flume which provides the minimal sedimentation upstream. The given data prove the applicability of flumes of critical depth in irrigation canals with small inclinations.

As an instrumentation there were used a developed software complex on the basis of the numerical decision of the Navier-Stokes equation system in a three-dimensional model and software complex of analysis and calculation of hydrometrical flumes according to the M.G. Bos's method. By comparing the results of laboratory and full-scale experiments it was found that the inaccuracy of the discharge dependence was 2...4% max. Taking into consideration the universality of the method the developed instrumentation can be used for designing a wide circle of flow-measuring structures as well as for a recalibration of existing hydrometrical structures including those built with breaching of the hardly fulfilled standards requirements. Parameters of hydrometrical flumes calculated by means of the developed software take extremely accurately into account the requirements and simultaneously – geometrical and hydraulic characteristics of irrigation canals. The given initial data prove the applicability of flumes of critical depth in irrigation canals with small slopes.

Hydrometry, flow-measuring structure, critical depth flume, discharge curve, measurement accuracy.

References

1. **Steven J. Wright, Blake P. Tullis, Tamara M. Long.** Recalibration of Parshall flumes at low discharges. *J. Irrigation and Drainage Engineering*. 1994; 120(2):348-362.
2. **Ackers P., White W.R., Perkins T.A., Harrison A.J.** Weirs and Flumes for Flow Measurement. Chichester-New York-Brisbane-Toronto, John Wiley and Sons, 1978.
3. **Bos M.G., Replogle S.A., Clemmens A.J.** Flow Measuring Flumes in Open Channel Systems. Chichester-New York-Brisbane-Toronto-Singapore, John Wiley and Sons, 1984.
4. ISO 4359 «Liquid flow measurement in open channels – Rectangular trapezoidal and U-shaped flumes». – Geneva, ISO, 1980. Revision: ISO 4359:2013.
5. **Kusher A.M.** Razrabotatj metod I kompyuternuyu tehnologiyu rascheta hydrometricheskikh lotkov, NTO. – M.: GNU VNIIGiM, 2011.
6. **Kusher A.M.** Raschet I vybor constructsii hydrometricheskogo lotka na kanalah vodohozyaistvennyh system // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prac. Conferentsii «Problemy razvitiya melioratsii I vodnogo hozyaistva i puti ih resheniya». Ch. 4: Vodnye object: sostoyanie, problem I puti ih resheniya». – M.: MGUP, 2011. – S. 176-183.
7. **Kusher A.M.** Issledovanie hydrometricheskikh lotkov s dlinnoj gorlovinoj chislennym metodom // Melioratsiya i okruzhayushchaya sreda: Yubilejny sb. Nauchnyh trudov. V. 2 / VNIIGiM. – M.: VNIIGiM, 2004. – S. 105-115.
- Investigation of the long throated flow-measuring flumes using a numerical method:
8. **Filippov E.G.** Hydraulika hydrometricheskikh sooruzhenij dlya otkrytyh potokov. – L.: Hydrometeoizdat, 1990. – 24 s.

9. Razrabotajj teoriyu hidravliki hydro-metricheskikh sooruzhenij i tehnologii vodoucheta na meliorativnyh systemah. NTO. – M.: VNIIGiM, 2004.

The material was received at the editorial office
31.03.2016

Information about the author

Kusher Anatolij Mikhailovich, candidate of technical sciences, leading researcher, FSBSI «The All-Russian scientific research institute of hydraulic engineering and land reclamation named after A.N. Kostyakov», 127550, Moscow, ul. B. Academicheskaya, 44; tel.: 8 (499) 154-52-09; e-mail: econgamk@pochtamt.ru

УДК 502/504:631.365

Н.А. РОМАНЕЕВ, В.В. ВАРЫВДИН, Д.А. БЕЗИК

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет», г. Брянск, Россия

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРЫ НОРИИ МЕТОДОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН

Условия работы машин, в частности, сельскохозяйственных, формируют определенные требования к конструкции узлов и отдельных деталей, к их компоновке, объему средств, привлекаемых на разработку и запуск в производство. С помощью компьютерной программы, позволяющей изменять параметры модели, добиваясь наилучших конструктивных соотношений, провели проверочный расчет норийной башни сушилки СП-50. В качестве инструмента исследования принята отечественная инновационная методика автоматизированного проектирования WinMachine, версия Structure 3D, позволяющая решать задачи в широком диапазоне вопросов. Была поставлена задача прогнозирования параметров сечения стандартного профиля для новых конструкций башни. Для уточнения и подтверждения данных, полученных с помощью компьютерного моделирования, для определения оптимальных параметров уголка был проведен полнофакторный эксперимент. С использованием средств, предоставленных математическим пакетом MATLAB, был получен аппроксимирующий многочлен для коэффициента устойчивости. Применение инновационной расчетной программы при проведении многовариантного проектирования опорной конструкции нории обеспечило оптимальное сочетание технических параметров проектируемого изделия, а также получение уравнения регрессии для коэффициента устойчивости по геометрическим параметрам стандартного профиля материала. Имеется реальная возможность производить расчеты по ряду параметров оптимизации конструкции: материалоемкость, напряжения и т.д. Точность результатов обеспечивается тем, что в основу методики расчета в названной программе положен метод конечных элементов. Расчеты конструкции башни как упругой системы производятся на прочность и устойчивость. Оставляя коэффициенты запаса прочности и устойчивости на достаточно высоком уровне, авторы сумели уменьшить металлоемкость башни для нории высотой 22 м и производительностью 50 т/ч на 2,5 т.

Башня, нория, прочность, устойчивость, металлоконструкция, уголок, сечение.

Введение. В пределах срока службы одного поколения техники часто приходится решать задачи ее совершенствования и повышения уровня надежности. Ускорение темпов жизни, требования экономики диктуют необходимость повышения производительности оборудования одновременно в категории массы и времени. Для выпускаемого оборудования такая ситуация обеспечивается постоянным увеличением скоростей и нагрузок в опорных конструкциях и узлах трения, что приводит к возрастанию размеров, массы, мо-

ментов инерции, увеличению вибрации машины и, как следствие, – к ужесточению напряженного состояния узлов деталей.

Материалы и методы исследования. Несколько лет назад возникла необходимость проведения нами проверочного расчета работающей конструкции. В исследованиях использовали отечественный пакет программ АРМ WinMachine, предназначенный для решения широкого спектра машиностроительных задач [1]. Простота расчетов дает возможность выполнять многовариантное