

Лабораторное моделирование катастрофического наводнения в Крымске

О. Н. Мельникова^{1,a}, К. В. Показеев^{1,b}, А. Е. Рождественский^{2,c}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²ООО «Физико-техническая корпорация национальной резервной системы». Россия, 127051, Москва, Большой Каретный пер., д. 8, стр. 2.

E-mail: ^aolamel@yandex.ru, ^bsea@phys.msu.ru, ^crojdest@rambler.ru

Статья поступила 22.04.2013, подписана в печать 08.05.2013.

Предлагается физическая модель, объясняющая возникновение передового фронтального трехметрового вала воды, прошедшего по руслу р. Адагум через г. Крымск 07.07.2012 при наводнении во время ливневых дождей, приведшего к катастрофическим разрушениям и жертвам. Показано, что причиной возникновения вала послужил скачок расхода воды, обусловленный конструкцией нерегулируемого водосброса. Конструкция не была рассчитана на изменение климата, приведшего к критическому увеличению объема дождевого стока. Впервые экспериментально показано, что скачок расхода воды связан с изменением режима стока через трубу водосброса, произошел без участия человека.

Ключевые слова: изменение климата, наводнение, водосброс, течение по трубам.

УДК: 556. PACS: 47.85.Dh.

Введение

Максимальный расход воды, прошедший 7 июля по р. Адагум через Крымск, составил около $1500 \text{ м}^3/\text{с}$, что приблизительно соответствует объему воды, выпавшему с осадками в водосборе бассейна реки в течение 4 ч. Основные разрушения городу нанес вал воды высотой около 3 м, пробежавший ночью по руслу реки на склонах гор. Разрушения в городе были отмечены на перепадах высот вдоль русла реки, а на других склонах их не было. Источником залпового расхода воды, породившего вал, мог быть сброс воды из Неберджаевского водохранилища, расположенного в горах над городом [1], в р. Неберджай, впадающую в р. Адагум. В этом случае на выходе водосброса мог образоваться вертикальный вал воды, как в головной волне, возникающей при прорыве плотины и бегущей иногда сотни километров с большой скоростью вдоль русла реки. На рис. 1 показан кадр, на котором виден такой вал, полученный в наших лабораторных экспериментах [2]. Вал образован вихревыми жгутами, устойчивыми к возмущениям, способными поднимать и переносить галечный грунт. На нижнем кадре, снятом после спада наводнения, видны разрушения на выходе водосброса Неберджаевского водохранилища в русло реки. Поваленные деревья и выбитая заградительная решетка на выходе шахты свидетельствует о проходе разрушающего вала. При катастрофическом стоке воды в водохранилище с окрестных склонов (площадь водосбора превышает площадь водного зеркала не менее чем в 10 раз) уровень воды в водохранилище примерно за 30 мин поднялся на 2–3 м. Водохранилище не имеет шлюзов, но имеется водосброс в виде вертикальной шахты радиусом $R = 5.3$ м. Верхний торец шахты на три метра ниже верхней отметки земляной плотины, высота шахты $L = 27$ м. Нижний торец соединен с горизонтальным тоннелем длиной 145 м, диаметром 4.5 м, который выходит в русло реки. Максимальное превышение уровня воды над трубой z определяется

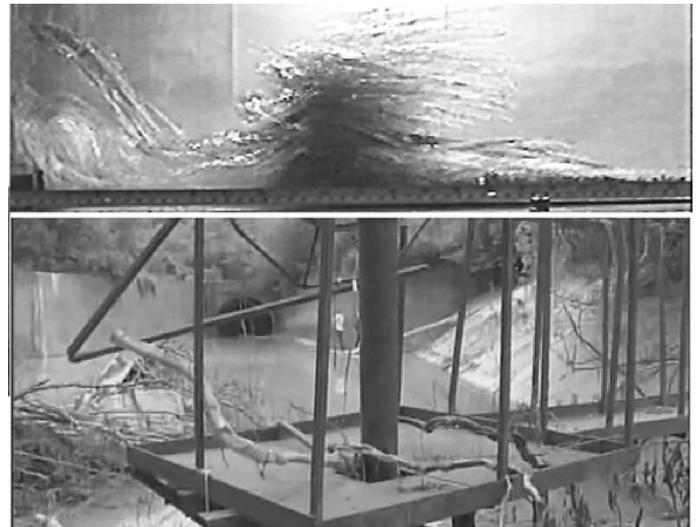


Рис. 1. «Стена воды» при скачке расхода воды в лабораторном эксперименте (верхний кадр). Разрушения после прохода «стены воды» на выходе водосброса в р. Неберджай (нижний кадр)

высотой плотины и составляет 3 м ($z/(2R) \approx 0.28$). По результатам обследования плотины в ночь наводнения уровень воды достиг максимальной отметки. На верхнем кадре рис. 2, сделанном после спада пикового расхода воды на следующее утро, видно, что шахта полностью заполнена водой, а на поверхности воды существует воронка. В обычном режиме вода в водохранилище находится либо ниже уровня шахты, либо стекает по стенкам в виде пленки (нижний кадр рис. 2). Максимальный расход в этом режиме не превышает $30 \text{ м}^3/\text{с}$. Для того чтобы выяснить, могло ли заполнение трубы водосброса привести к скачку расхода воды более чем на порядок, надо оценить зависимость расхода воды через водосброс от уровня воды над ним.

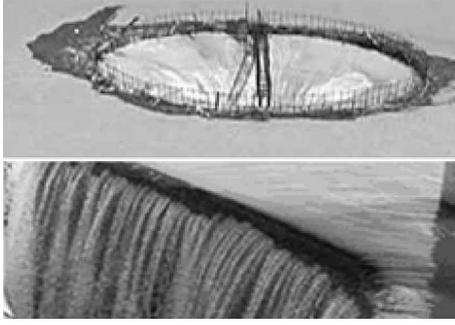


Рис. 2. Воронка над заполненной трубой водосброса Неберджаевского водохранилища (верхний кадр). Сток воды по стенкам водосброса (нижний кадр)

Для приблизительной верхней оценки расхода воды Q по трубе, полностью заполненной водой, можно использовать формулу Торричелли, справедливую для стационарного течения идеальной жидкости при постоянном уровне воды в водохранилище:

$$u = \sqrt{2g(L+z)}, \quad Q = \pi R^2 u, \quad (1)$$

где u — скорость воды на выходе трубы, g — ускорение силы тяжести. Расчет по (1) дает $Q = 2243 \text{ м}^3/\text{с}$. Эта оценка очень завышена, так как превышает расход воды, прошедший через Крымск ($1500 \text{ м}^3/\text{с}$). Для получения реальной оценки надо решать задачу с переменным уровнем и учетом потерь на трение в шахте водосброса. Необходимо оценить расход воды через водосброс для двух режимов — при заполненной трубе и при стоке по стенкам трубы, особенности перехода одного режима в другой при изменении высоты уровня воды над трубой. Задача решалась аналитически, проверка результатов решения проведена в лабораторном эксперименте. Проверка показала, что результаты решения согласуются с экспериментальными данными, а расчеты для Неберджаевского водохранилища подтверждают сделанное предположение о катастрофическом увеличении расхода воды при заполнении водохранилища и трубы водосброса.

1. Расход воды в двух режимах заполнения водосброса

Обозначим расход воды, текущей по стенкам трубы, Q_w , при заполнении трубы Q , соответствующие скорости на выходе в русло u_w и u . Расходы и их отношение определяются формулами

$$Q_w = u_w \pi d(2R-d), \quad Q = u \pi R^2, \quad \frac{Q}{Q_w} = \frac{u}{u_w} \frac{R^2}{d(2R-d)}, \quad (2)$$

где d — толщина слоя воды, стекающего по стенкам трубы при минимальном превышении уровня воды над верхним концом трубы. Для реальной оценки расходов надо найти скорости потока воды в (2). Известны решения задачи слива воды из больших резервуаров с различными насадками на малом выходном отверстии [3, 4]. В этих задачах решение близко по форме формуле Торричелли с поправочными коэффициентами, учитывающими трение и форму насадки. Для нашей задачи основное движение жидкости проходит по сливной трубе. Рассмотрим задачу о сливе воды из широкого

резервуара по узкой заполненной вертикальной трубе при $z \ll L$. Будем считать, что только вертикальные составляющие скорости жидкости отличны от нуля. Поместим начало координат на верхней торце трубы, а ось z направим против силы тяжести. Уравнение неразрывности позволяет записать соотношение скорости потока на поверхности воды $u_{\text{sur}} = \frac{dz}{dt}$ и скорости воды в полностью заполненной трубе u :

$$u = u_{\text{sur}} n, \quad n = \frac{S_{\text{sur}}}{\pi R^2}, \quad n \gg 1, \quad (3)$$

где S_{sur} — площадь поверхности воды в резервуаре. Скорость на поверхности воды очень мала, потерями на трение в верхнем слое над трубой при $z > 0$ можно пренебречь, что позволяет записать уравнение Бернулли для поверхности воды и входа в трубу, считая течение стационарным для данного уровня z :

$$P_{\text{atm}} + \rho g z + \rho \frac{u_{\text{sur}}^2}{2} = P(0) + \rho \frac{u^2}{2}, \quad (4)$$

где ρ — плотность воды, g — ускорение силы тяжести. Из (4) находим понижение давления от поверхности воды к входу в трубу. Этот же перепад давления с обратным знаком будет иметь место между торцами вертикальной трубы:

$$\Delta P = -\rho \left(\frac{u^2}{2} - g z \right). \quad (5)$$

Для оценки скорости потока в трубе в режиме ее полного заполнения запишем уравнение движения столба воды в вертикальной трубе длиной L :

$$m \frac{du}{dt} = mg - \pi R^2 \Delta P - f \rho S u^2, \quad (6)$$

$$m = \rho \pi R^2 L, \quad S = 2\pi R L.$$

Здесь f — безразмерный коэффициент трения воды о шероховатую поверхность [3, 4]. Для единичного объема жидкости получаем

$$\frac{du}{dt} = g \left(1 + \frac{z}{L} \right) - \frac{u^2}{2L\sigma}, \quad \sigma = \frac{R}{4fL+R}. \quad (7)$$

Решая уравнение (7), находим зависимость скорости потока воды в трубе от толщины слоя воды над ней (режим полного заполнения трубы):

$$u(z) = \sqrt{2g\sigma \left(z + L - \frac{L}{n}\sigma \right)}. \quad (8)$$

Будем считать, что в режиме стока воды по стенкам вода бежит по трубе в виде сплошной пленки толщиной d . Получаем уравнение движения единичного объема цилиндрического слоя воды в трубе

$$\frac{du_w}{dt} = g \left(1 + \frac{z}{L} \right) - \frac{f}{d} u_w^2. \quad (9)$$

Решая (9), получаем скорость u_w жидкости, стекающей по стенкам трубы:

$$u_w(z) = \sqrt{\frac{gd}{2fL} \left(z + L - \frac{d}{2fn} \right)}, \quad R \gg d. \quad (10)$$

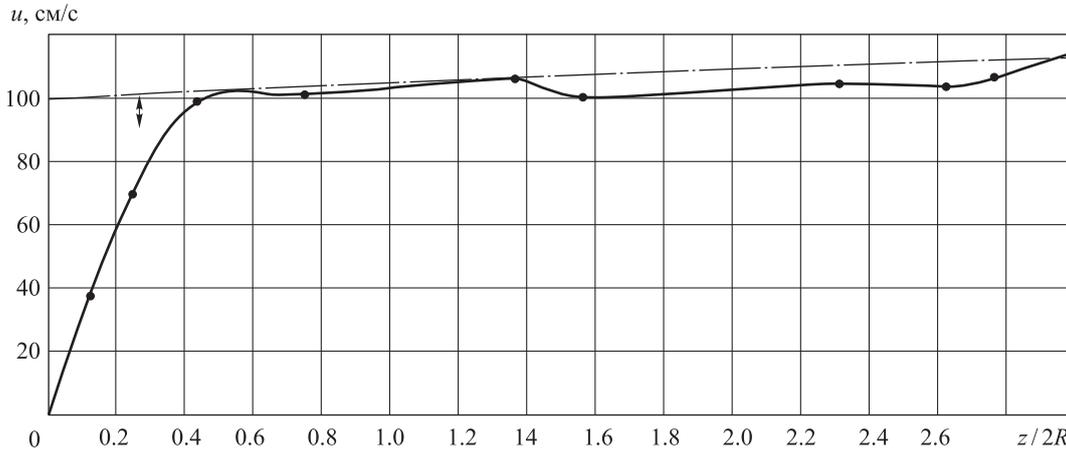


Рис. 3. Зависимость скорости потока в вертикальной трубе от относительного уровня воды. Сплошная линия — эксперимент, штрихпунктирная — расчет по (8) для заполненной трубы. Стрелка показывает доверительный интервал для вероятности 0.67

Если пренебречь малыми величинами второго порядка, то отношение скоростей стока и расходов воды для двух режимов в (2) можно записать

$$\frac{u}{u_w} = \sqrt{\frac{R}{d}}, \quad \frac{Q}{Q_w} = \sqrt{\frac{R^3}{4d^3}}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что для $R > 10d$ при переходе одного режима в другой скачок расхода воды может достигать одного-двух порядков измеряемой величины. Для того чтобы рассчитать возможный пиковый расход воды в Неберджаевском водохранилище, надо проверить полученную модель в лабораторных условиях.

2. Методика и результаты экспериментов

Серия модельных экспериментов была проведена в прямоугольном резервуаре из прозрачного органического стекла. Горизонтальное сечение канала составляло $S_{\text{sur}} = (98 \times 98) \text{ см}^2$, высота стенок 50 см. В центре резервуара на дне имелось круглое отверстие, в которое вставлялась вертикальная труба с внутренним диаметром 1.6 см. В экспериментах общая длина трубы L составляла 9, 17, и 17.8 см, длина части трубы ниже дна резервуара равнялась 8 см. Все трубы были изготовлены в двух вариантах: с гладкими стенками с коэффициентом трения $f = 0.008$ и шероховатыми стенками с $f = 0.028$ для числа Рейнольдса $Re = (u \cdot 2R)/\nu \approx 10^4$, где ν — кинематическая вязкость. На нижнем конце трубы был установлен затвор. Резервуар заполнялся водой до уровня, превышающего высоту трубы, а затем полностью открывался затвор и процесс слива фиксировался видеокамерой. На прозрачную стенку канала помещалась масштабная линейка, позволяющая определять изменение уровня воды в резервуаре на видеозаписи. Вертикальная скорость жидкости на поверхности воды определялась по смещению уровня воды dz/dt . Доверительный интервал определения скорости слива для вероятности 0.67 не превышал 7% измеряемой величины.

На рис. 3 приведен график зависимости скорости вытекания воды из резервуара от относительного уровня воды $u(z/(2R))$, полученный в эксперименте с трубой длиной $L = 17.8$ см. Там же приведены результаты

расчета, выполненного по (8) при $f = 0.028$. Если $z/(2R) > 0.4$, результаты расчета по (8) соответствуют экспериментальным данным, разброс не превышает доверительного интервала. Отклонение экспериментального графика от расчетного наблюдается для $z/(2R) < 0.4$. В этой области скорость потока в трубе резко падает, а на поверхности воды над трубой возникает воронка (рис. 4). Ось воронки совпадает с осью трубы, а диаметр воронки на поверхности воды равен внутреннему диаметру трубы. При появлении воронки горизонтальными составляющими скорости течения на поверхности воды уже пренебречь нельзя, хотя труба и заполнена. Относительный уровень воды над трубой $z/(2R) \approx 0.4$ можно считать границей режимов. Обозначим скорость потока в трубе на границе режимов u_f . При дальнейшем падении уровня воды в резервуаре воронка быстро спустилась внутрь трубы. При этом сформировался новый режим — стекание жидкости по стенкам. Скорость резко упала и при значении относительного уровня $z/(2R) \approx 0.02$ достигла 10 см/с. Скорость слива на границе режимов $u_f = 100$ см/с, т.е. примерно на порядок превышала скорость слива при стекании жидкости по стенкам трубы. В проведенных шести экспериментах было исследовано влияние высоты трубы и шероховатости стенок на полученный результат.

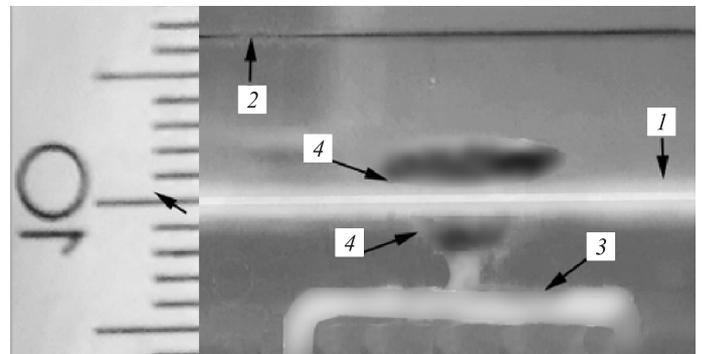


Рис. 4. Воронка на поверхности воды над трубой водосброса в лабораторном эксперименте: 1 — уровень воды на передней стенке канала, 2 — то же на задней стенке, 3 — труба, 4 — воронка

Эксперименты показали, что граница режимов с плоской поверхностью воды и с воронкой наблюдается при одном и том же значении $z/(2R) \approx 0.4$ во всех экспериментах. По-видимому, это связано с тем, что в слое воды над трубой потерями на трение можно пренебречь, и определяющим параметром служит толщина слоя воды, отнесенная к диаметру трубы. На рис. 5 приведен график зависимости u/u_f от относительной высоты уровня $z/(2R)$ по экспериментальным данным всех экспериментов. Все данные аппроксимированы одной линией тренда, что позволяет использовать полученную зависимость для оценок пикового расхода воды Неберджаевского водохранилища.

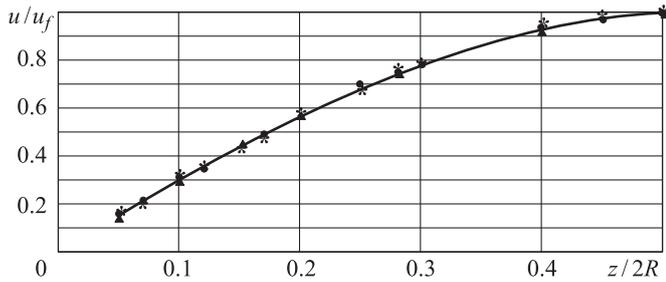


Рис. 5. График зависимости u/u_f от относительной высоты уровня $z/(2R)$, полученный на основе экспериментальных данных. Для $f = 0.008$: ромбы $L = 9$ см, треугольники 17 см, кресты 17.8 см. Для $f = 0.028$: пауки $L = 9$ см, шестеренки 17 см, квадраты 17.8 см

3. Расчет пикового расхода в Неберджаевском водохранилище

В Неберджаевском водохранилище ливневые стоки могли поднять уровень воды над водосбросом до максимального значения $z/(2R) \approx 0.28$. В соответствии с экспериментальными данными, приведенными на рис. 5, при таком значении относительного уровня на поверхности воды должна быть воронка, что и подтверждается натурными данными (рис. 2). Для использования полученной модели в расчетах следует учесть дополнительные потери на трение в горизонтальной шахте длиной $l = 145$ м и радиусом $R_1 = 2.25$ м, создающие перепад давления $\Delta p_1 = \frac{\rho \cdot 2\pi R_1 \cdot u_1^2}{\pi R_1^2}$, где $u_1 = uR^2/R_1^2$ — скорость потока в горизонтальной трубе. В вертикальной трубе появляется дополнительная сила сопротивления, которая должна быть учтена в (6) в виде дополнительного слагаемого в правой части $-\Delta p_1 \pi R^2$. Для этого случая скорость потока в заполненной вертикальной трубе

определяется по формуле

$$u(z) = \sqrt{2g\delta \left(z + L - \frac{L + \frac{R^2}{R_1^2}l}{n} \delta \right)}, \quad (12)$$

$$\delta = \frac{R}{4f \left(L + \frac{R^2}{R_1^2}l \right) + R}.$$

Чтобы получить максимальное значение скорости течения u_{\max} в вертикальном туннеле водосброса, значение u_f рассчитываем по (12) при $z = 0.8R$. В соответствии с данными рис. 5 скорость потока в вертикальной трубе для $z/(2R) \approx 0.28$ равна $u \approx 0.75u_f$. Расчет при коэффициенте трения $f = 0.006$ (для $Re = 10^5$) и $n = 20000$ дает максимальное значение скорости потока в вертикальной трубе $u_{\max} = 15.5$ м/с. Расход воды через трубу радиуса 5.3 м достигает 900 м³/с и составляет почти 2/3 расхода воды, прошедшего через Крымск. Полученные данные подтверждают предложенную гипотезу о внезапном повышении расхода воды, прошедшего через водосброс, при заполнении туннеля водосброса.

Заключение

«Мгновенный» скачок расхода воды в сливной системе Неберджаевского водохранилища до уровня порядка 900 м³/с, по видимому, привел к формированию разрушающего вала воды, прошедшего через г. Крымск. Независимая оценка пикового расхода р. Неберджай ниже плотины составляет около 800 м³/с, что согласуется с нашими оценками и экспериментом. Такой же «мгновенный» обратный переход слива в водохранилище в спокойный режим после снижения уровня, определяемый периметром (а не площадью) сливной воронки, сделал явление скачкообразного сброса воды в ночное время ненаблюдаемым.

Список литературы

1. http://www.ibgts.ru/works/water_reservoir_less50/Neberdgaevskoe.php
2. Мельникова О.Н. // Изв. РАН. Физ. атмосферы и океана. 2010. **46**, № 2. С. 137.
3. Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцев Б.Т. и др. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М., 1982.
4. Streeter V.L., Wylie E.B., Bedford K.W. Fluid Mechanics. 9th ed. Singapore: McGraw-Hill, 1998.

The laboratory modeling of the catastrophic flood in Krymsk

O. N. Mel'nikova^{1,a}, K. V. Pokazeev^{1,b}, A. E. Rozhdestvensky^{2,c}

¹Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

²Limited Liability Company «Physics and Technology Corporation National Reserve», Moscow 127051, Russia. E-mail: ^aolamel@yandex.ru, ^bsea@phys.msu.ru, ^crojdest@rambler.ru.

It suggests a physical model to explain the emergence of front three-meter shaft of water passing through the bed of the Adagum River in town Crymsk on 07/07/2012 at a flood caused by heavy rains. This water wall led to the

catastrophic damage and casualties. We have shown that the cause of the shaft emergence was a jump of flow discharge through the uncontrolled spillway. The spillway was not designed for a climate change, which led to a critical increase in storm water. For the first time it is experimentally shown that the jump of the flow discharge is due to changing in the flow regime through the pipe of the spillway.

Keywords: climate change, flood, spillway, flow through pipes.

PACS: 47.85.Dh.

Received 22 April 2013.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2013).

Сведения об авторах

1. Мельникова Ольга Николаевна — доктор физ.-мат. наук, доцент, доцент; e-mail: olamel@yandex.ru.
2. Показеев Константин Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-16-77; e-mail: sea@phys.msu.ru.
3. Рождественский Александр Евгеньевич — ген. директор «Физико-технической корпорации национальной резервной системы»; e-mail: rojdest@rambler.ru.