

УДК 532.5:519.6

Г.Г. Кашеварова, А.С. Мартиросян

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ВОЛНЫ ПРОРЫВА НА ЗДАНИЯ

В настоящее время при застройке перспективных территорий города, попадающих в зону возможного затопления, для принятия проектных решений требуется оценить механическую безопасность проектируемого здания или предусмотреть и обосновать его меры защиты. Для этого необходимо знать гидродинамическое давление волны прорыва на обтекаемый объект. Для решения этой задачи использовался программный комплекс FlowVision. Исследовалось влияние скорости потока, а также параметров самого объекта строительства (его формы, размеров, ориентации относительно направления течения потока) на величину гидродинамического давления. Для этого использовалась математическая теория планирования многофакторного эксперимента.

Ключевые слова: волна прорыва, гидродинамическое давление, компьютерное моделирование, FlowVision, теория планирования многофакторного эксперимента.

G.G. Kashevarova, A.S. Martirosyan

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DEFINITION BREAKTHROUGH WAVE HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE BUILDING

Currently looking at building up areas of the city within the area of a possible flood, for making design decisions required to estimate the mechanical safety of the designed building or to provide and justify its protection measures. For this it's necessary to know the hydrodynamic pressure of the load breakthrough wave on a streamlined object. To solve this problem we used software package FlowVision. We study the influence of flow rate, as well as the parameters of the building (its shape, size, orientation relative to the direction of flow-stream) on the value of the hydrodynamic pressure. To do this, we used a mathematical theory of planning multifactor experiment.

Keywords: wave breakthrough, hydrodynamic pressure, computer simulation, FlowVision, multifactor experiment planning theory.

Подпорные гидротехнические сооружения довольно надежны и долговечны – многие из них функционируют десятки и даже сотни лет. Однако материалы мировой статистики и события недавних лет свидетельствуют о том, что аварии на гидроузлах возможны, они могут привести к повреждению и разрушению плотин и примыкающих к ним

сооружений. Разрушение (прорыв) гидротехнических сооружений может произойти в результате: действия сил природы (землетрясений, ураганов, размывов плотин, износа и старения оборудования); техногенных чрезвычайных ситуаций (заклинивание затворов, разрушение шлюзовых ворот, удар судна и др.); воздействий человека (просчеты при проектировании или ошибки при эксплуатации ГТС: непрофессиональные действия персонала, плохой контроль за состоянием гидросооружений и гидромеханического оборудования, несвоевременность и неполнота ремонтов); преднамеренных разрушений (терактов). За последние 70 лет произошло более тысячи аварий на крупных гидротехнических сооружениях [1, 2].

В результате гидродинамической аварии происходит стремительное затопление обширных территорий волной прорыва, основными поражающими факторами которой являются высота волны, скорость движения и длительность затопления.

Волна прорыва представляет собой неустановившееся движение потока воды, перемещающегося с большой скоростью, который в своем движении вдоль русла реки непрерывно изменяет высоту, скорость движения, ширину и другие параметры. Фаза интенсивного подъема уровня воды называется фронтом волны прорыва, который может быть крутым при перемещении волны прорыва по участкам русла, близким к разрушенному гидротехническому сооружению, и относительно пологим – на значительном удалении от него. Вслед за фронтом волны прорыва высота ее начинает интенсивно возрастать, достигая через некоторый промежуток времени максимума, называемого гребнем, который движется, как правило, медленнее фронта волны прорыва.

Для каждого города, расположенного на берегу реки, а также для большинства прибрежных населенных пунктов гидрологической службой зафиксированы критические уровни воды в зонах возможного затопления. При разработке проектов крупных гидроузлов всегда предусматривается прогнозирование параметров потенциальной волны прорыва [3] либо на основе решения инженерных задач и рекомендаций СНиП, либо с использованием специального программного обеспечения [4].

Динамическое воздействие гидротока – распространенный источник опасности для различных объектов, находящихся в зоне возможного затопления. Строительство в таких зонах – задача сложная

и часто нерациональная ни с технической, ни с экономической точек зрения. Но поскольку избежать этого не всегда удастся, здания в потенциально опасных зонах следует делать более устойчивыми к действию некоторых поражающих факторов волны прорыва. Например, для снижения гидродинамических нагрузок на конструкции здания можно использовать предохранительные конструкции, увеличивающие прочность стен.

В настоящее время при застройке перспективных территорий города, попадающих в зону возможного затопления, для принятия проектных решений требуется оценить механическую безопасность проектируемого здания или предусмотреть и обосновать его меры защиты. Для обоснованных выводов о возможности нового строительства необходимо знать нагрузку воздействия волны прорыва на обтекаемый объект [5, 6].

Основным поражающим фактором волны прорыва, приводящим к разрушению зданий и сооружений, является гидродинамическое давление потока. При прохождении гидравлической волны мимо здания возникает сложная дифракционная картина взаимодействия и объект подвергается воздействию нестационарных (изменяющихся во времени давлений). Поле давлений зависит от параметров волны, характеристик объекта и его ориентации относительно фронта волны.

Математическая модель гидродинамической задачи

СНиП 2.06.04–82* «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» рекомендует нагрузки от волн на обтекаемые преграды определять на основе экспериментальных исследований или из решения гидродинамической задачи.

Базой любого исследования в области вычислительной гидродинамики является формулировка основных уравнений [7, 8]:

– сохранения импульса (Навье – Стокса или Эйлера)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f; \quad (1)$$

– неразрывности (сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0; \quad (2)$$

– сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j H) = -\frac{\partial Q_j}{\partial x_j} + f_j u_j. \quad (3)$$

Здесь $i, j = 1, \dots, 3$, предполагается суммирование по одинаковым индексам; x_1, x_2, x_3 – оси координат; t – время; μ – динамический коэффициент вязкости. Член f_i выражает действие массовых сил.

Кроме того, необходимо также задать начальные и граничные условия.

В этой системе уравнений независимыми искомыми параметрами являются три компоненты скорости u_1, u_2, u_3 и давление p . Плотность ρ жидкости при скоростях примерно до 0,3 числа Маха можно полагать величиной постоянной (несжимаемая жидкость).

Представленная математическая формулировка является системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, которая имеет аналитическое решение лишь в очень простых случаях. Современные численные методы и программные комплексы (ANSYS Flotran, ADINA, FlowVision, Fluent, CFD и др.) позволяют более точно решать такие задачи.

Задача взаимодействия потока жидкости и здания может быть решена либо посредством совместного моделирования в каком-либо программном комплексе (например, STAR-CCV+ или ANSYS в сочетании с входящим в ее состав модулем Flotran), либо использованием отдельных программ: решающих гидродинамическую задачу (например, FlowVision) и задачу определения напряженно-деформированного состояния конструкций здания (например, ANSYS).

Тенденцией развития ведущих программных продуктов является реализация в каждом из них набора математических моделей (ММ), позволяющих как можно более полно моделировать все встречающиеся на практике физические эффекты. Пользователь подключает нужные модели на стадии постановки задачи, задавая затем соответствующие начальные и граничные условия и требуемые исходные данные для каждой конкретной задачи.

Цель данного исследования – изучить влияние скорости потока, а также параметров самого объекта строительства (его формы, размеров, ориентации относительно направления течения потока) на величину гидродинамической нагрузки от действия волны прорыва.

Численная реализация задачи в программном комплексе FlowVision

Для решения этой задачи, учитывая особенности ее постановки, целесообразно использовать программный комплекс FlowVision [9]. Следует заметить, что FlowVision работает только с трехмерной геометрией, поэтому двумерные модели необходимо рассматривать как частный случай трехмерных.

Для проведения вычислительного эксперимента строится двумерная расчетная область, которая формируется с помощью внешней программы SolidWorks и затем импортируется в FlowVision.

Затем в FlowVision надо определиться с выбором модели и ее параметров (физических и параметров метода расчета) для внутренних точек расчетной области, а также заданием на границах расчетной области начальных и граничных условий.

В качестве модели расчета выбрана «Несжимаемая жидкость». Данная модель описывает течения вязкой жидкости при малых числах Маха ($M < 0,3$), малых и больших (турбулентных) числах Рейнольдса. Допускаются малые изменения плотности, что позволяет естественным образом учесть подъемную силу. В модель входят уравнения Навье – Стокса, энергии и уравнение конвективно-диффузионного переноса концентрации примеси.

В начальный момент времени задаются начальные значения компонентов вектора скорости $V_{x,ini}$, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ и давления P_{ini} , Па.

В модели определены следующие типы границ: стенка, симметрия, вход, свободный выход, для которых установлено соответствие между типом границы и типом граничного условия.

Задание граничных условий

Тип границы	Тип граничного условия
Стенка	Стенка; логарифмический закон, который позволяет учитывать влияние на скорость шероховатости стенки посредством введения эффективной молекулярной вязкости [10]
Симметрия	Стенка с проскальзыванием. Это значит, что компоненты вектора скорости $V_i (i=1...3)$ удовлетворяют одному из условий: $V_i _w=0$, если $n_i \neq 0$ или $(\nabla V_i, n) _w=0$, если $n_i = 0$; где n_i – компоненты вектора нормали n к границе w
Вход	Нормальная скорость $V _w=V_{nw}$. На границах расчетной области w задается нормальная компонента вектора скорости V_{nw}

Тип границы	Тип граничного условия
Свободный выход	Нулевое давление/Выход. На границах расчетной области w для скорости и давления определены следующие граничные условия: – Давление на границе области равно нулю: $P _w = 0$. – Скорость на границе расчетной области устанавливается по следующему правилу. В расчетной ячейке, примыкающей к границе, определяется направление вектора скорости. Если вектор скорости направлен внутрь расчетной области, то нормальная составляющая скорости обнуляется $(V, n) > 0$, $V _w = V_{tw}$. Если вектор скорости направлен из расчетной области, то устанавливаются нормальные производные компонент вектора скорости равные нулю $(V, n) \leq 0$, $\nabla(V_i, \mathbf{n}) _w = 0$. Здесь n – нормаль к границе, V_{tw} – тангенциальная составляющая скорости на границе

Граничные условия схематично изображены на рис. 1.

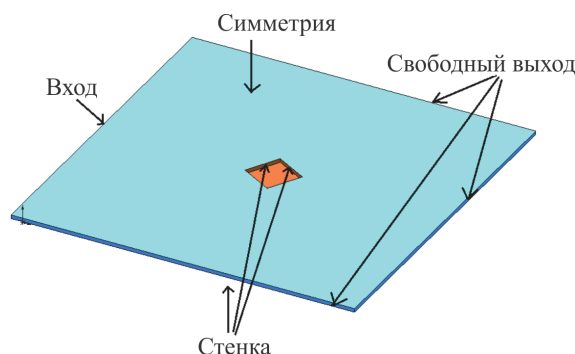


Рис. 1. Граничные условия

В FlowVision численное интегрирование уравнений (1)–(3) с учетом начальных и граничных условий выполняется методом конечных объемов (МКО) с использованием прямоугольной адаптивной локально измельченной сетки (рис. 2). Интерфейс FlowVision включает возможности автоматического и ручного контроля формирования сетки [9].

Выполняется расчет, который представляет собой итерационный процесс (рис. 3). В результате расчета определяется характер распределения давления при взаимодействии волны прорыва со зданием, который можно представить в виде изополей и изолиний (рис. 4).

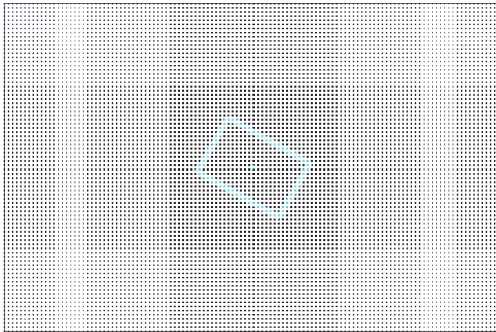


Рис. 2. Расчетная сетка

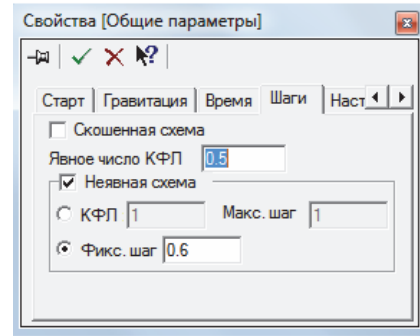


Рис. 3. Задание шага по времени

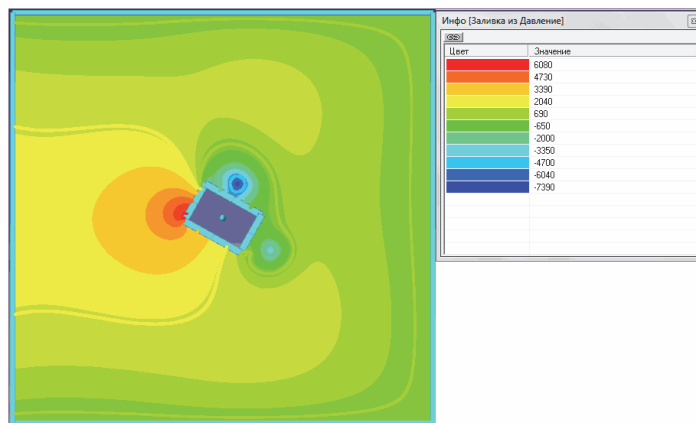


Рис. 4. Характер распределения давления при взаимодействии волны прорыва со зданием (изополя + изолинии)

Поле распределения давлений и максимальная величина нагрузки (давления гидропотока) зависят от параметров волны прорыва, характеристик объекта и его ориентации относительно фронта волны. В подобных исследованиях физические эксперименты поставить достаточно сложно, поэтому проводились вычислительные эксперименты с использованием теории математического планирования многофакторного эксперимента для получения эмпирической зависимости между нагрузкой и влияющими на нее параметрами.

Вычислительные эксперименты

Вычислительные эксперименты проводились для реального проектируемого здания в потенциально опасной зоне возможного затопления. При этом использовались прогнозируемые параметры потенци-

альной волны прорыва на территории строительства Пермского края [5]. Исследовалось влияние на максимальную величину нагрузки трех факторов:

z_1 – скорость, которой обладает волна при подходе к зданию. Рассматриваемый диапазон изменения скорости (от 1 до 5 м/с) определен в соответствии с рекомендациями СНиП о величине этого параметра, приводящего к разрушению многоэтажного здания;

z_2 – угол атаки, т.е. угол, под которым расположено здание по отношению к направлению движения волны прорыва. Угол меняется в пределах от 0 до 60°;

z_3 – коэффициент соотношения сторон здания прямоугольного в плане, изменяющийся в диапазоне от 1 до 2 (рис. 5).

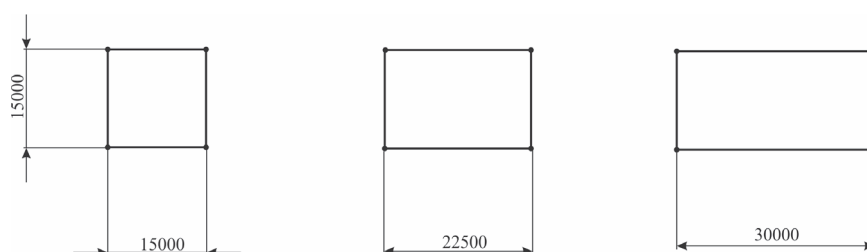


Рис. 5. Модели зданий с разным соотношением сторон (фактор z_3)

Использовалась квадратичная модель уравнения регрессии

$$y = \sum_{i=0}^n b_i z_i + \sum_{i < j} b_{ij} z_i z_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} z_i^2, \quad (4)$$

где b_i – коэффициенты уравнения; z_i – натуральные значения варьируемых на трех уровнях факторов; b_{ij} – коэффициенты, характеризующие парное взаимодействие; $z_i z_j$ – эффект парного взаимодействия.

В табл. 1 приведены натуральные и кодированные значения факторов на трех уровнях, а в табл. 2 представлен план проведения эксперимента (план Хартли).

Таблица 1

Натуральные и кодированные значения факторов

Факторы	Уровни факторов		
	–1	0	+1
z_1 (скорость, м/с)	1	3	5
z_2 (угол атаки, град)	0	30	60
z_3 (соотношение сторон)	1	1,5	2

Таблица 2

План проведения эксперимента (план Хартли)

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	Y (кПа)
1	1	1	1	19,3
2	1	1	-1	16,7
3	1	-1	1	20,6
4	1	-1	-1	16,5
5	-1	1	1	0,7
6	-1	1	-1	0,6
7	-1	-1	1	0,8
8	-1	-1	-1	0,6
9	1	0	0	18,3
10	-1	0	0	0,7
11	0	1	0	6,1
12	0	-1	0	7,0
13	0	0	1	7,2
14	0	0	-1	5,9
15	0	0	0	6,5

Коэффициенты уравнения регрессии являются решением нормальной системы уравнений (СЛАУ), которая в матричном виде записывается как

$$\bar{B} = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot \bar{Y}, \quad (5)$$

где X – матрица независимых переменных размерности $(N \times n_b)$, i -я строка которой представляет собой вектор эффектов $\bar{F}(x)$ в i -й строке плана эксперимента; N – число поставленных опытов; n_b – число членов уравнения регрессии; $\bar{Y}$ – вектор опытных значений функции отклика – максимальной нагрузки (давления) на преграду, полученных в результате проведения серии вычислительных экспериментов в программном комплексе FlowVision с использованием численного моделирования и метода конечных объемов.

Из решения системы линейных алгебраических уравнений (5) находится вектор коэффициентов $\bar{Y}$, значения которого получены в результате расчета и записаны в последнем столбце табл. 2.

Уравнение регрессии в кодированных значениях факторов при подстановке полученных коэффициентов имеет следующий вид:

$$y = 6,544 + 8,8x_1 - 0,21x_2 + 0,83x_3 - 0,125x_1x_2 + 0,8x_1x_3 - 0,2x_2x_3 + 2,944x_1^2 - 0,006x_2^2 - 0,006x_3^2. \quad (6)$$

На рис. 6, 7 представлены некоторые графики зависимости максимального давления на здание (функции отклика) от влияющих факторов.

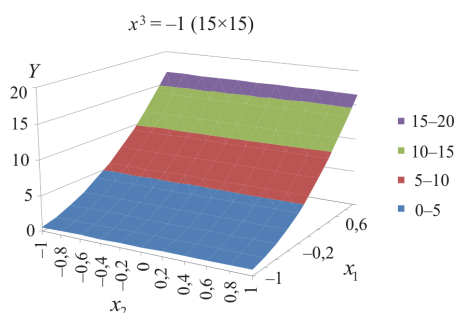


Рис. 6. Зависимость максимального давления на здание от скорости потока x_1 и угла атаки x_2 при постоянном соотношении сторон здания в плане (15×15)

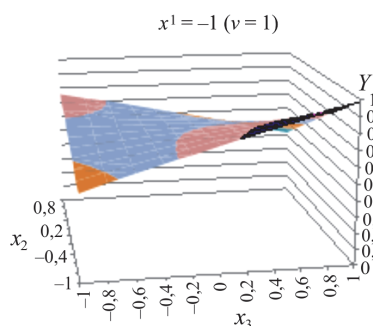


Рис. 7. Зависимость максимального давления на здание от угла атаки потока x_2 и соотношения сторон здания в плане x_3 при постоянной скорости потока $v = 1$ м/с

Для исследования качества полученной модели необходимо знать ее вероятностные характеристики. Статистическая значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивалась посредством сравнения абсолютных значений коэффициентов с величинами доверительных интервалов разброса, зависящих от критерия Стьюдента. Все коэффициенты оказались значимыми.

Адекватность уравнения регрессии (функции отклика) оценивалась по результатам расчета давления в промежуточных точках интервалов значений факторов и вне рассмотренного интервала (табл. 3).

Проанализировав полученное уравнение регрессии (6), можно сделать выводы, что наибольшее влияние на величину давления оказывает скорость движения волны прорыва x_1 , т.е. при увеличении скорости растет значение давления; наименьшее влияние оказывает угол атаки x_2 – при его увеличении давление уменьшается; при увеличении соотношения сторон x_3 давление увеличивается.

Таблица 3

Результаты расчета давления

Номер точки	Кодированные значения факторов	Натуральные значения факторов	$P_{\text{расч}}$ (FV), кПа	P_z (МФЭ), кПа	Разница, %
1	$x_1 = 0,5$ $x_2 = -1$ $x_3 = 1$	$z_1 = 4$ $z_2 = 0$ $z_3 = 2$	13,450	13,372	0,6
2	$x_1 = -0,5$ $x_2 = -1$ $x_3 = 1$	$z_1 = 2$ $z_2 = 0$ $z_3 = 2$	3,263	3,647	1
3	$x_1 = 1$ $x_2 = 1$ $x_3 = -1,5$	$z_1 = 5$ $z_2 = 60$ $z_3 = 0,5$	19,84	15,79	20

Оценка адекватности модели функции отклика показала: принятая квадратичная модель уравнения регрессии в рассмотренном диапазоне изменения параметров адекватна, разница между результатами расчета давления в ПК FlowVision ($P_{\text{расч}}$ (FV)) и по уравнению регрессии P_z (МФЭ) не превышает 1 % (1 и 2 строки табл. 3); погрешность результатов вне рассмотренного интервала составляет 20 % (3 строка табл. 3).

Таким образом, данную модель следует использовать только в рассмотренном диапазоне факторного пространства.

Библиографический список

1. Васильев О.Ф. Распространение волн прорыва при разрушении плотин // Гидротехническое строительство. – 1974. – № 11. – С. 49–50.
2. Калустян Э.С. Статистика и причины аварий плотин // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1997. – № 3. – С. 40–50.
3. Инструкция по определению зон возможных затоплений при прорыве напорных фронтов гидроузлов. – М.: МПС, 1984.
4. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: учеб. пособие / Т.В. Кондранин, Б.К. Ткаченко, М.В. Березникова, А.В. Евдокимов, А.П. Зуев. – М.: Изд-во МФТИ, 2005. – 104 с.
5. Кашеварова Г.Г., Пепеляев А.А., Мартиросян А.С. Оценка безопасности проектируемого кирпичного здания в зоне возможного затопления // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2013. – № 3(11). – С. 31–43.

6. Пчёлкин В.И. Безопасность зданий и сооружений в зоне гидродинамических аварий на гидротехнических сооружениях // Технологии гражданской безопасности. Вестник ФЦ ВНИИ ГОЧС. – 2004. – № 2(4). – С. 66–69.

7. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. – М.; Ижевск: R&C Dynamics, 2000. – 576 с.

8. Евстигнеев Н.М. Численный метод решения уравнений Навье – Стокса на неструктурированных сетках с применением Лагранжево-Эйлерового метода // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 1(93). – С. 163–170.

9. Аксенов А.А., Гудзовский А.В. Пакет прикладных программ FlowVision. – М.: Изд-во МФТИ, 1998. – С. 45–56. – (Аэрофизика и прикладная математика).

10. Souders D.T., Hirt C.W. Modeling Roughness Effects in Open Channel Flows, FSI-02-TN60. 10 p.

References

1. Vasilev O.F. Rasprostranenie voln proryva pri razrushenii plotin [Propagation of destruction wave at dam failure]. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo*, 1974, no. 11, pp. 49-50.

2. Kalustyan E.S. Statistika i prichiny avariyy plotin [Statics and causes of dam accident]. *Problemy bezopasnosti pri chrezvychaynykh situatsiyakh*, 1997, no. 3, pp. 40-50.

3. Instruktsiya po opredeleniyu zon vozmozhnykh zatopleniy pri proryve napornykh frontov gidrouzlov [Instructions on determination of floodable zones at hydrosystem failure]. Moscow: MPS, 1984.

4. Kondranin T.V., Tkachenko B.K., Bereznikova M.V., Evdokimov A.V., Zuev A.P. Primenenie paketov prikladnykh programm pri izuchenii kursov mekhaniki zhidkosti i gaza [Using application packages when studying fluid mechanics]. *Moskovskiy fiziko-tekhnicheskii institut*, 2005. 104 p.

5. Kashevarova G.G., Pepelyaev A.A., Martirosyan A.S. Otsenka bezopasnosti proektiruемого кирпичного здания в зоне возможного затопления [Safety evaluation of designed brick building in flood risk area]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2013, no. 3(11), pp. 31-43.

6. Pchelkin V.I. Security of buildings and structures in the zone of hydrodynamic accidents on the waterworks. *Civil security technology. Bulletin of FC "Civil Defense Institute"*, 2004, no. 2(4), pp. 66-69.

7. Prandtl L. *Gidroaeromekhanika* [Hydroaeromechanics]. Moscow, Izhevsk: R&C Dynamics, 2000. 576 p.

8. Evstigneev N.M. Chislennyy metod resheniya uravneniy Nave – Stoksa na nestrukturirovannykh setkakh s primeneniem Lagranzhevo-Eylerovogo metoda [Numerical method of solution of Navier-Stokes equation at unstructured grids with using Lagrange – Euler method]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 1(93), pp. 163-170.

9. Aksenov A.A., Gudzovskiy A.V. Paket prikladnykh programm FlowVision [FlowVision application packages]. Moskovskiy fiziko-tekhnicheskii institut, 1998, pp. 45-56.

10. Souders D.T., Hirt C.W. Modeling Roughness Effects in Open Channel Flows, FSI-02-TN60. 10 p.

Об авторах

Кашеварова Галина Геннадьевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ggk@pstu.ru).

Мартиросян Анна Сергеевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: anka_31@mail.ru).

About the authors

Galina G. Kashevarova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Construction Mechanics and Computer-Aided Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ggk@pstu.ru).

Anna S. Martirosyan (Perm, Russian Federation) – Doctoral Student, Department of Construction Mechanics and Computer-Aided Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: anka_31@mail.ru).

Получено 1.10.2014