

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА ПО СУХОМУ РУСЛУ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АВАРИИ

Стриганова М.Ю., Шаталов И.М., Щербакова М.К.,
Бандолик Н.Н., Гудков А.А., Комзолова Д.С.

Цель. Экспериментально исследовать характер движения и параметры нестационарных водных потоков в нижнем бьефе по сухому руслу, образующихся при нарушении целостности или прорыве плотины в условиях высокогорья.

Методы. Гидравлические расчеты, экспериментальные исследования, видеонаблюдения.

Результаты. Разработаны модель рассматриваемого гидротехнического сооружения и методика проведения эксперимента. Выявлен характер движущегося потока при гидродинамической аварии на высокогорной плотине. Экспериментальным путем определена высота волны перемещения в расчетных створах при движении водного потока по наклонному сухому руслу.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании последствий возможной гидродинамической аварии, что необходимо для разработки мероприятий по эвакуации населения, ликвидации последствий затопления и оценки возможного ущерба.

Ключевые слова: волна перемещения, скорость потока, высота волны, створ, глубина потока.

(Поступила в редакцию 11 апреля 2022 г.)

Введение

Причинами разрушения или обрушений грунтовых плотин являются: сейсмические воздействия на сооружения; подпорный уровень воды, превышающий расчетную величину; аварийное состояние сооружения; неэффективность работы дренажных систем и др.

Сценарии развития гидродинамической аварии различны. Возможно нарушение целостности подпорного сооружения (образование прорана) в теле плотины, размеры которого существенно меньше общей длины напорного фронта и меньше или равны высоте сооружения, или полное его разрушение. В результате данной чрезвычайной ситуации возникают волны перемещения, определение основных параметров которых (скорости, глубины потока) является весьма актуальной задачей.

В условиях высокогорья уклон дна как сухого русла, так и русла водотока достигает достаточно большого значения (10–20 м/км) в отличие от равнинных русел, для которых это значение не превышает 1 м/км. Высокогорный рельеф при разрушении подпорных сооружений способствует возникновению бурного потока, движущегося с большой скоростью и сносящего все на своем пути. Опасность появляющейся при этом волны перемещения обусловлена и тем, что она захватывает грунт, составлявший тело размытой плотины, и различные скальные породы сухого русла, что увеличивает ее ударную силу.

При развитии любого сценария аварии происходит относительно постепенное опорожнение водохранилища, при котором расход воды при распространении потока по нижнему бьефу грунтовой плотины уменьшается в начальном и увеличивается в конечном створе. Для определения основных параметров такого потока были проведены экспериментальные исследования в гидродинамическом лотке.

Основная часть

Лабораторный метод исследования на моделях используется достаточно давно при проектировании, строительстве и эксплуатации разнообразных инженерных сооружений. Конечная цель данного эксперимента при переносе его результатов на натуральный объект (высокогорную грунтовую плотину) – оценка возможных последствий, обусловленных распространением волны перемещения, которая возникает при разрушении этого объекта.

Тестовым объектом исследования было выбрано Тахтакорпюнское водохранилище на территории Азербайджана, созданное одной из наиболее высоких земляных плотин не только в регионе, но и в Европе. Располагается данное сооружение на высоте около 140 м над долиной с жилой застройкой и сетями энергоснабжения, водоснабжения и транспортного сообщения. Протяженность склона от плотины составляет 2,32 км (рис. 1) [1].

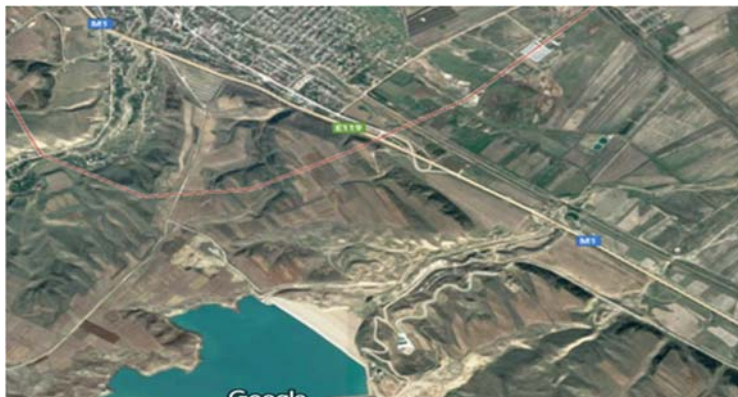


Рисунок 1. – Плотина Тахтакорпюнского водохранилища

Провести натурные эксперименты на подобных объектах не представляется возможным. Поэтому лабораторные исследования являются самым оптимальным методом определения необходимых параметров водных потоков при гидродинамической аварии. Был проведен количественный эксперимент, который позволил зафиксировать волну перемещения и определить геометрические и кинематические ее параметры. Гидравлические сопротивления, шероховатость дна, аэрация потока и волнообразование не учитывались в связи с большой инерционностью горного потока.

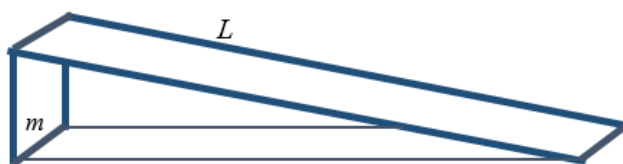
Для проведения лабораторных экспериментов на первом этапе были определены критерии подобия, которые учитывались при разработке модели тестового сооружения. Были выбраны критерии геометрического и динамического подобия, равенство которых для природы и модели обеспечивает возможность пересчета полученных экспериментальных значений исследуемых параметров потоков для натуральных условий.

Динамическое подобие выражается через число Фруда, Fr :

$$Fr_{\text{мод}} = Fr_{\text{нат}} = \frac{v^2}{gh}. \quad (1)$$

Геометрическое подобие определено геометрическими размерами согласно модели (рис. 2):

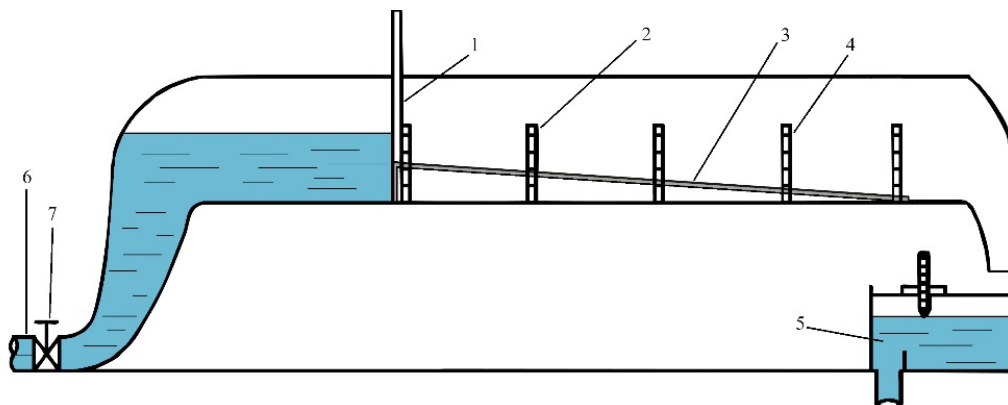
$$\frac{m_{\text{мод}}}{L_{\text{мод}}} = \frac{m_{\text{нат}}}{L_{\text{нат}}}. \quad (2)$$



m – высота расположения плотины над горизонтальной плоскостью, м; L – длина нижнего бьефа (склона), м

Рисунок 2. – Модель нижнего бьефа (склона)

Эксперименты проводили в лаборатории Белорусского национального технического университета в прямооточном гидравлическом лотке шириной 0,245 м с прозрачными стенками (рис. 3). Поток снимали неподвижной камерой.



1 – подвижный затвор; 2 – уровенные рейки (мерные линейки); 3 – модель сухого русла; 4 – гидравлический лоток; 5 – металлический лоток с водосливом Томсона; 6 – питающая труба; 7 – задвижка

Рисунок 3. – Схема экспериментального лабораторного стенда

Вода в гидравлический лоток 4 подавалась из водооборотного бассейна насосом по питающей трубе 6. Уровень воды (напор) в лотке регулировался задвижкой 7. Вода, поступающая в лоток, накапливалась перед подвижным затвором 1. Установленный уровень соответствовал нормальному подпорному уровню (НПУ) водохранилища перед плотиной. Затвор 1 имел возможность перемещения в вертикальной плоскости, что позволило смоделировать аварию на гидротехническом сооружении с образованием волны перемещения. Из гидравлического лотка вода сбрасывалась в водоприемный лоток 5, в котором был установлен измерительный водослив Томсона для определения расхода воды [2]. Далее вода снова поступала в водооборотный бассейн.

На дно лотка, под нижней гранью затвора 1, была установлена модель сухого русла в масштабе 1:1000 (рис. 4), расположенного в нижнем бьефе имитационной модели гидротехнического сооружения. Лоток по длине модели сухого русла был разделен на участки мерными линейками (уровенные рейки) 2 для измерения глубины движущегося потока. Места установки уровенных реек считались измерительными створами. Первый створ располагался в месте расположения затвора 1. По результатам видеосъемки определялись визуально показания на уровенных рейках и фиксировалось перемещение потока воды (т.е. волны перемещения) в створах до и после поднятия затвора 1.

Для определения основных параметров потока, движущегося в нижнем бьефе сооружения, была разработана методика проведения лабораторных исследований. Лабораторные исследования проводились в следующей последовательности:

1. Включался центробежный насос, подающий воду в гидравлический лоток.
2. Опускался затвор на верхнюю плоскость модели сухого русла.
3. Открывалась задвижка 7, и заполнялся гидравлический лоток (уровень воды соответствовал значению напора в верхнем бьефе сооружения).
4. Устанавливался необходимый напор в верхнем бьефе имитационной модели гидротехнического сооружения.
5. Затвор поднимался постепенно в течение 2, 4, 10, 15 с и мгновенно.
6. С помощью уровенных реек и видеокамеры замерялась глубина воды (т.е. высота волны) в нижнем бьефе в каждом створе.
7. С помощью водослива Томсона определялся расход воды.

Эксперименты были проведены при различных временных интервалах подъема затвора 1 (от 2 до 15 с или мгновенно), что соответствовало различным сценариям разрушения плотины: от возникновения прорана вдоль основания плотины до полного ее исчезновения.



Рисунок 4. – Общий вид экспериментального лабораторного стенда с моделью нижнего бьефа (сухого русла)

Всего было определено шесть серий экспериментов с пятикратным повторением каждой серии. Далее была проведена обработка результатов измерений и наблюдений, для того чтобы в дальнейшем провести сопоставление с результатами теоретических расчетов и уточнить количественные значения полученных параметров. По результатам были построены графики зависимостей $h = f(T)$, что соответствовало изменению глубины потока воды h (высоты волны перемещения) в зависимости от времени движения потока T в нижнем бьефе модели при различном времени открытия затвора (рис. 5).

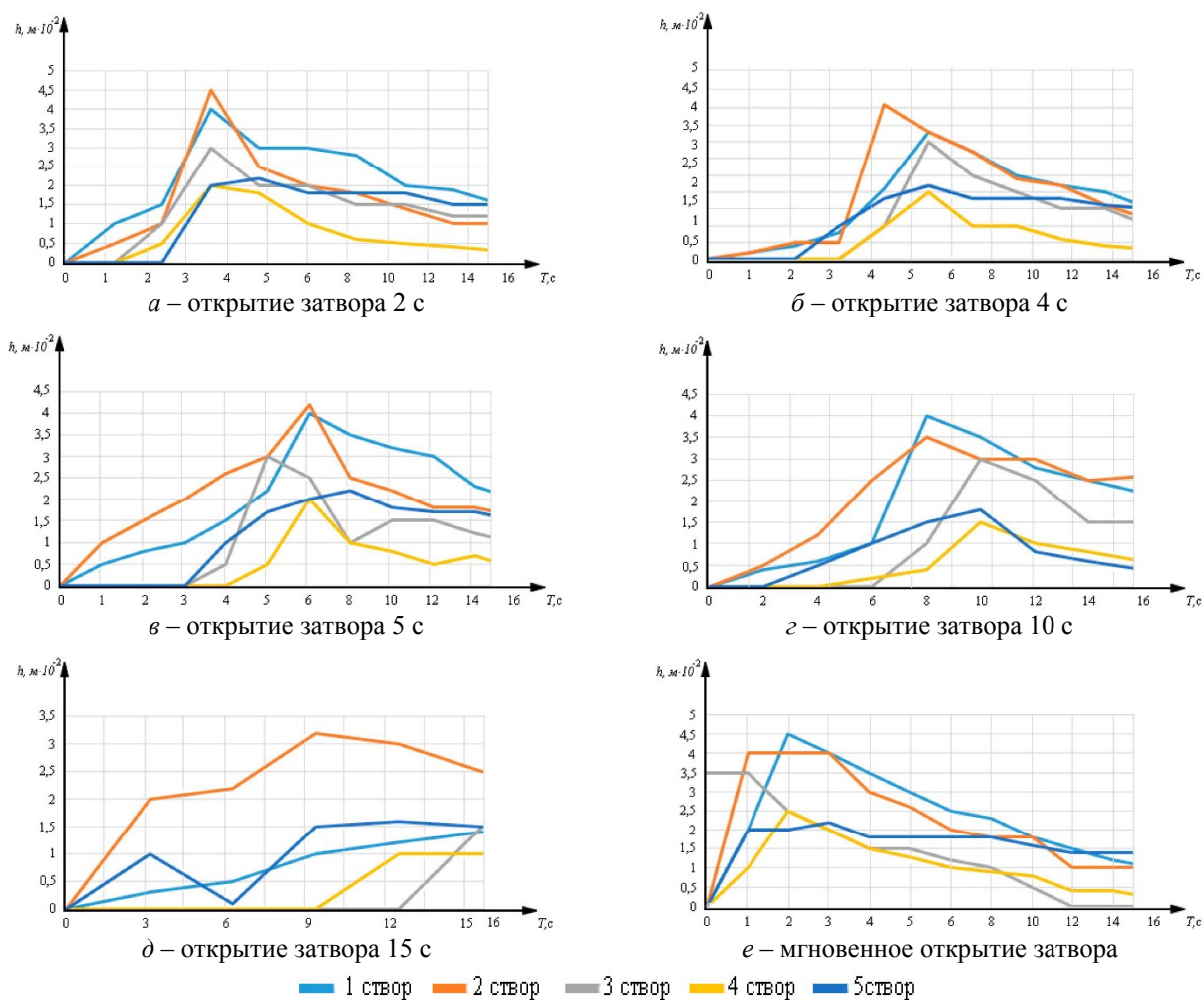


Рисунок 5. – График изменения глубины потока воды h (высоты волны перемещения) в зависимости от времени перемещения потока T в нижнем бьефе модели при различном времени открытия затвора

Видеонаблюдение и анализ построенных графиков показывает, что в начальный момент времени перемещения потока воды на участке, расположенном на некотором расстоянии от подвижного затвора, происходит довольно резкое увеличение глубины (и, соответственно, массы или расхода) вытекающего потока воды (рис. 5 а–д). Затем вода стекает по крутому склону лотка, находясь в бурном состоянии, со значительным уменьшением глубины h и увеличением средней скорости v потока (рис. 6). Это свидетельствует о появлении прямой отрицательной волны перемещения, о которой упоминалось в ранее опубликованных работах [3; 4]. Здесь следует отметить, что при мгновенном открытии подвижного затвора I (что соответствует полному разрушению земляной плотины) появлялась прямая положительная волна перемещения с резким уменьшением глубины в начальном сечении и мгновенным растеканием бурного потока (рис. 5е, 6).



Рисунок 6. – Общий вид волны перемещения при мгновенном открытии затвора

При движении по наклонной поверхности (горному склону) поток всегда находится в бурном состоянии, а волна перемещения обладает максимальной скоростью и огромной разрушительной способностью. Далее, достигнув горизонтальной плоскости в гидродинамическом лотке, поток переходит в спокойное состояние; при этом появляется обратная положительная волна (рис. 7), у которой глубина увеличивается, что в природных условиях приведет к затоплению окружающей территории и дополнительным локальным разрушениям в водоворотной зоне.



Рисунок 7. – Общий вид обратной волны

Заключение

Проведение лабораторных модельных исследований потока, движущегося по наклонной плоскости, имитирующей нижний бьеф в виде сухого русла высокогорной плотины при гидродинамической аварии, позволило описать процесс формирования волны перемещения при различных сценариях разрушения сооружения.

Экспериментальная модель движения волны перемещения визуально подтвердила рассмотренные ранее теоретические исследования [3; 4] об имеющей место прямой отрицательной волне при протекании потока по наклонному склону вследствие опорожнения водохранилища и обратной положительной волне ниже склона вследствие торможения потока. Однако при мгновенном открытии подвижного затвора (что соответствует полному разрушению земляной плотины) появлялась прямая положительная волна перемещения с резким уменьшением глубины в начальном сечении и мгновенным растеканием бурного потока.

Разработанная методика лабораторных исследований, проведенный эксперимент и полученные результаты позволяют оценить гидравлические показатели (скорость и глубина) движущегося потока от времени развития прорана. Полученные экспериментальные данные будут использованы для сопоставления с результатами теоретических расчетов для оценки возможностей и достоверности выбранного метода численного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стриганова, М.Ю. Аспекты теоретических и экспериментальных исследований движения водных потоков при прорыве плотин / М.Ю. Стриганова, С.А. Самедов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 4. – С. 493–500. – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-4.493. – EDN: YPMHSP.
2. Бонч-Осмоловская, Н.Е. Механика жидкости и газа. Лабораторный практикум: учеб. пособие / Н.Е. Бонч-Осмоловская [и др.]; под ред. И.В. Качанова и В.Н. Юхновца. – 4-е изд., перераб. и доп. – Минск: БНТУ, 2007. – 295 с.
3. Стриганова М.Ю. Математическая модель пространственно изменяющегося неустановившегося движения потока при прорыве напорных гидротехнических сооружений в условиях высокогорья / М.Ю. Стриганова [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 48–58. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.48. – EDN: KGXUEV.
4. Стриганова М.Ю. Об интегрировании дифференциальных уравнений неустановившегося постепенно изменяющегося движения потока в открытом русле в условиях высокогорья при прорыве плотины / М.Ю. Стриганова [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 3. – С. 328–334. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-3.328. – EDN: BVHHOW.

**Экспериментальные исследования параметров движения потока по сухому руслу
в условиях высокогорья при гидродинамической аварии**

**Experimental studies of the parameters of flow movement along a dry riverbed
under high-altitude conditions at a hydrodynamic accident**

Стриганова Марина Юрьевна

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: asb@ucp.by

ORCID: 0000-0002-8100-733X

Marina Yu. Striganova

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: asb@ucp.by

ORCID: 0000-0002-8100-733X

Шаталов Игорь Михайлович

Белорусский национальный технический
университет, кафедра гидротехнического
и энергетического строительства, водного
транспорта и гидравлики,
старший преподаватель

Адрес: пр-т Независимости, 65,
220013, г. Минск, Беларусь

Email: hidrokaf@bntu.by

ORCID: 0000-0002-5348-5318

Igor M. Shatalov

Belarusian National Technical University,
Chair of Hydrotechnical and Power Engineering,
Water Transport and Hydraulics,
Senior Lecturer

Address: Nezavisimosti ave., 65,
220013, Minsk, Belarus

Email: hidrokaf@bntu.by

ORCID: 0000-0002-5348-5318

Щербакова Мария Константиновна

Белорусский национальный технический
университет, кафедра гидротехнического
и энергетического строительства, водного
транспорта и гидравлики,
старший преподаватель

Адрес: пр-т Независимости, 65,
220013, г. Минск, Беларусь

Email: hidrokaf@bntu.by

ORCID: 0000-0002-8864-0517

Maria K. Shcherbakova

Belarusian National Technical University,
Chair of Hydrotechnical and Power Engineering,
Water Transport and Hydraulics,
Senior Lecturer

Address: Nezavisimosti ave., 65,
220013, Minsk, Belarus

Email: hidrokaf@bntu.by

ORCID: 0000-0002-8864-0517

Бандолик Николай Николаевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: asb@ucp.by

ORCID: 0000-0002-3364-9389

Nikolay N. Bandolik

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: asb@ucp.by

ORCID: 0000-0002-3364-9389

Гудков Алексей Александрович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет
техносферной безопасности, курсант

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: alex.gudkov01@mail.ru

Alexey A. Gudkov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Technosphere Safety Faculty, cadet

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: alex.gudkov01@mail.ru

Комзолова Дарья Сергеевна

Белорусский национальный технический
университет, факультет энергетического
строительства, студентка

Адрес: пр-т Независимости, 65,
220013, г. Минск, Беларусь

Email: hidrokaf@bntu.by

Darya S. Komzolova

Belarusian National Technical University,
Faculty of Energy Construction, student

Address: Nezavisimosti ave., 65,
220013, Minsk, Belarus

Email: hidrokaf@bntu.by

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PARAMETERS OF FLOW MOVEMENT ALONG A DRY RIVERBED UNDER HIGH-ALTITUDE CONDITIONS AT A HYDRODYNAMIC ACCIDENT

**Striganova M.Yu., Shatalov I.M., Shcherbakova M.K.,
Bandolik N.N., Gudkov A.A., Komzolova D.S.**

Purpose. To experimentally investigate the nature of movement and parameters of non-stationary water flows in the lower reaches along a dry riverbed formed when the integrity is violated or the dam breaks under high-altitude conditions.

Methods. Hydraulic calculations, experimental studies, video surveillance.

Findings. A model of the hydraulic structure under consideration and a methodology for conducting the experiment have been developed. The nature of the moving flow during a hydrodynamic accident at a high-altitude dam is revealed. The height of the displacement wave in the design sections when the water flow moves along a sloping dry riverbed was determined experimentally.

Application field of research. The obtained results can be used to predict the consequences of a possible hydrodynamic accident, which is necessary for the development of measures of population evacuation, elimination of the flooding consequences, and assessment of possible damage.

Keywords: displacement wave, flow velocity, wave height, gate, flow depth.

(The date of submitting: April 11, 2022)

REFERENCES

1. Striganova M.Yu., Samedov S.A. Aspekty teoreticheskikh i eksperimental'nykh issledovaniy dvizheniya vodnykh potokov pri proryve plotin [Aspects of theoretical and experimental researches of the movement of water flows during a break of dams]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 4. Pp. 493–500. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-4.493. EDN: YPMHSP.
2. Bonch-Osmolovskaya N.E., Zayats A.M., Ivashchkin V.V., Karpenchuk I.V., Kachanov I.V., Kozlov D.A., Kondratovich A.N., Kuz'menkov V.I., Ledyan Yu.P., Nedbal'skiy V.N., Shatalov I.M., Shul'pin I.A., Yukhnovets V.N. *Mekhanika zhidkosti i gaza. Laboratornyy praktikum [Fluid and gas mechanics. Laboratory workshop]*: tutorial. Minsk: BNTU, 2007. 298 p. (rus)
3. Striganova M.Yu., Shatalov I.M., Samedov S.A., Nedashkovskaya I.V., Rabchenya V.S. Matematicheskaya model' prostranstvenno izmenyayushchegosya neustanovivshegosya dvizheniya potoka pri proryve napornykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v usloviyakh vysokogor'ya [Mathematical model of a spatially variable unstable flow motion at the breakthrough of hydrotechnical structures under the conditions of highland]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 1. Pp. 48–58. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.48. EDN: KGXUEV.
4. Striganova M.Yu., Shatalov I.M., Samedov S.A., Shcherbakova M.K., Nedashkovskaya I.V., Rabchenya V.S. Ob integrirovanii differentsial'nykh uravneniy neustanovivshegosya postepenno izmenyayushchegosya dvizheniya potoka v otkrytom rusle v usloviyakh vysokogor'ya pri proryve plotiny [On the integration of differential equations of unsteady gradually changing flow in an open channel in highland conditions when a dam breaks]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 3. Pp. 328–334. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-3.328. EDN: BBHHOW.