

Результаты экспериментальных исследований границ смены режимов течения за уступом

Соискатель А.А. Каверин*,

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: течения за уступом; поверхностный режим; поверхностно-донный режим; экспериментальные исследования

Явление поверхностного режима течения известно почти 100 лет [1]. За это время построено большое количество водосбросов и совмещенных зданий гидроэлектростанций [2–8], но все они запроектированы на основании результатов, полученных экспериментально. В Европе и Америке исследования [7–13], как правило, проводились для обоснования принятия инженерных решений по конкретным водосбросам. Результаты таких исследований недостаточно проанализированы и не систематизированы. Основным интерес, с точки зрения применения в инженерной практике, представляет смена донного затопленного режима поверхностным и поверхностно-донным режимами при увеличении глубины за уступом. В справочной литературе [14, 15] и научных публикациях [16] часто приводятся теоретические и эмпирические зависимости по определению глубины потока, отвечающей границам смены режимов течения за водосбросами с уступом. Но эмпирические формулы имеют четкие пределы применимости. Зависимость М.Ф. Складнева [17] применима при $Fr \leq 40$ и $\psi_d \geq 2$, зависимость Г.П. Скребкова [18] применима при $Fr \geq 5$, где $\psi_d = d / h_1$ – относительная высота уступа; d – высота уступа; h_1, V_1 – глубина и скорость потока на уступе; $Fr = V_1^2 / (g * h_1)$ – число Фруда на сходе потока с уступа; h_2 – глубина нижнего бьефа; $\xi_2 = h_2 / h_1$ – относительная глубина нижнего бьефа.

Приведенное в качестве примера на рис. 1 сравнение расчетных зависимостей, взятых из различных исследований, при $\psi_d = 1$ по верхней границе образования поверхностного режима показало, что они имеют значительное расхождение между собой. Это вызывает трудности при их использовании в гидравлических расчетах.

В гидравлической лаборатории инженерно-строительного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета были проведены эксперименты по изучению течения за уступом. Опыты проводились на гидравлической модели [19] по схеме истечения из-под щита. Толщина струи в опытах была 8 и 12 см, изменение высоты уступа в пределах $0.66 \leq \psi_d \leq 4$; $1.2 \leq Fr \leq 9$.

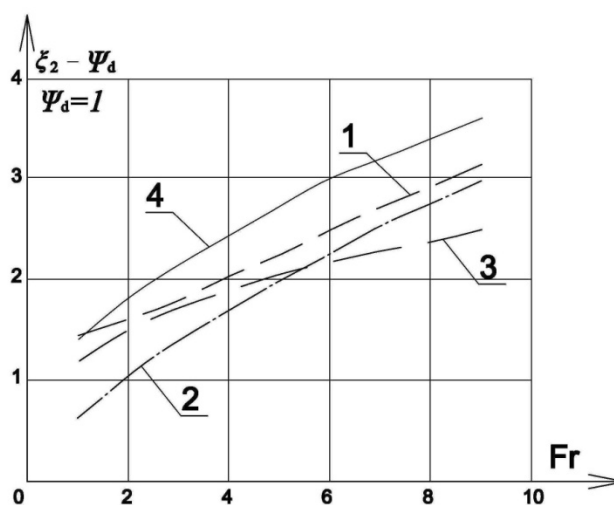


Рисунок 1. Сравнение расчетных зависимостей по образованию поверхностного режима при $\psi_d = 1$ (1-[17], 2-[18], 3-[4], 4-[20])

Всего было проведено более 70 опытов по изучению границ смены режимов течения за водосбросом с уступом в плоских условиях.

Учитывая, что не существует единого понятия, определяющего суть смены режимов, оговорим, что именно понималось под границей режимов в проведенных исследованиях.

Под 1-й критической границей смены режимов понималась такая глубина потока, при которой поверхностные скорости потока больше придонных. Измерение скоростей проводилось в 5 см от дна и в 5 см от уровня свободной поверхности в створе за второй волной. Под верхней границей h_{2e} понималась глубина, соответствующая смене режимов при повышении глубины потока. Под нижней границей h_{2n} , соответственно, при понижении глубины потока. Под 2-й

Каверин А.А. Результаты экспериментальных исследований границ смены режимов течения за уступом

критической границей смены режимов понимался уровень глубины потока h_{II} , при котором начиналось разрушение (образование водоворота) на гребне первой волны. Под 3-й критической границей смены режимов, соответствующей смене поверхностного режима поверхностно-донным, понималась такая глубина потока h_{III} , при которой скорости у дна за обрушением гребня второй волны становились больше, чем скорости у поверхности.

Параметры опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры опытов

Относительная высота уступа ψ_d	Число Фруда		Количество опытов
	Fr min	Fr max	
0,67	1,18	3,16	6
1	1,19	8,66	13
1,32	1,3	3,1	4
1,5	1,26	9,04	7
1,58	1,23	3	4
1,98	1,24	3,02	9
2	1,2	8,13	10
3	1,21	7,82	9
4	1,168	8,06	9

Результаты экспериментов по определению верхней границы образования представлены на рис. 2.

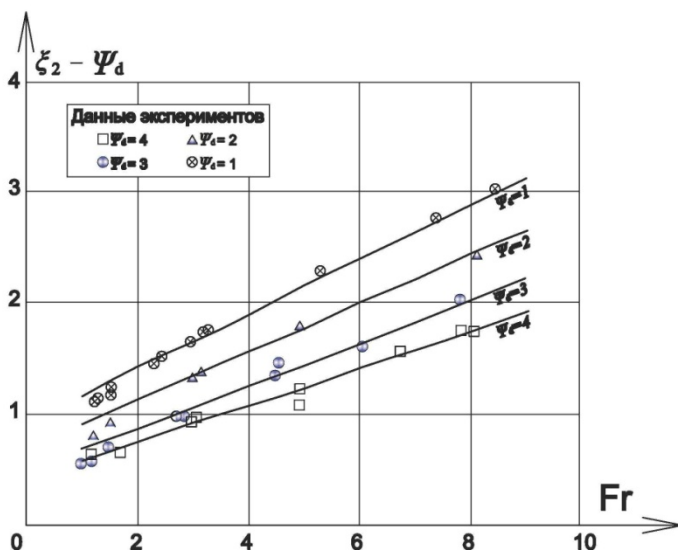


Рисунок 2. Результаты экспериментальных исследований верхней границы образования поверхностного режима

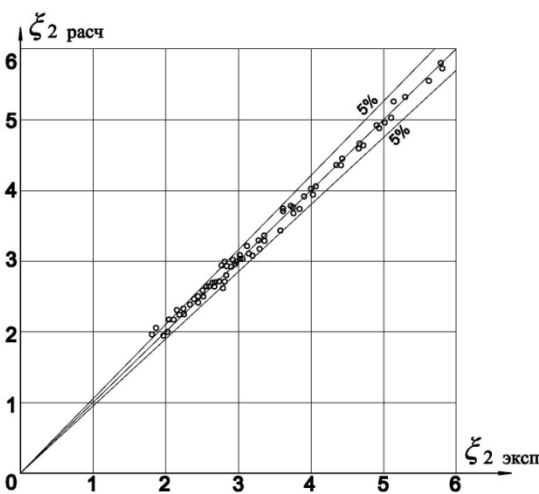


Рисунок 3. Сопоставление данных по зависимости (1) с данными экспериментов при верхней границе образования поверхностного режима

Задачей обработки результатов измерений было выявление функциональной зависимости глубины потока за уступом h_2 от исходных параметров эксперимента: высоты уступа d и кинематической характеристики потока на сходе с уступа – числа Фруда.

По результатам проведенных экспериментов выведена эмпирическая зависимость для верхней границы образования поверхностных режимов:

$$\xi_{2кр1} = 1 + \psi_d + A_2 * Fr + B_2, \tag{1}$$

где $A_2 = -0.02486\psi_d + 0.26648$; $B_2 = 0.03539\psi_d^2 - 0.34711\psi_d - 0.245$.

Полученные экспериментальные данные и эмпирическая зависимость (1) хорошо согласуются (см. рис. 2 и 3).

Диапазон глубин между верхней h_{2e} и нижней $h_{2н}$ I критического режима фактически является зоной гидродинамического гистерезиса. В результате проведенных исследований выявлена качественная зависимость диапазона гидродинамического гистерезиса от высоты уступа и числа Фруда (Fr) на сходе потока с уступа [21]:

$$\Delta \xi_2 = (h_{e1} - h_{н1}) / h_1 = (0.0614\psi_d^2 - 0.076\psi_d + 0.414) / Fr. \quad (2)$$

Результаты обработки данных экспериментов позволили установить эмпирическую зависимость для определения границы затопления поверхностных режимов в виде

$$\xi_{2крII} = A_1(\psi_d + \frac{1}{2}(\sqrt{8Fr+1} - 1)) + B_1, \quad (3)$$

где $A_1 = -0.01448\psi_d + 0.79371$; $B_1 = 0.22256\psi_d + 0.45$.

Результаты полученных данных во многом совпадают с расчетной зависимостью Г.П. Скребкова [18] (см. рис. 4).

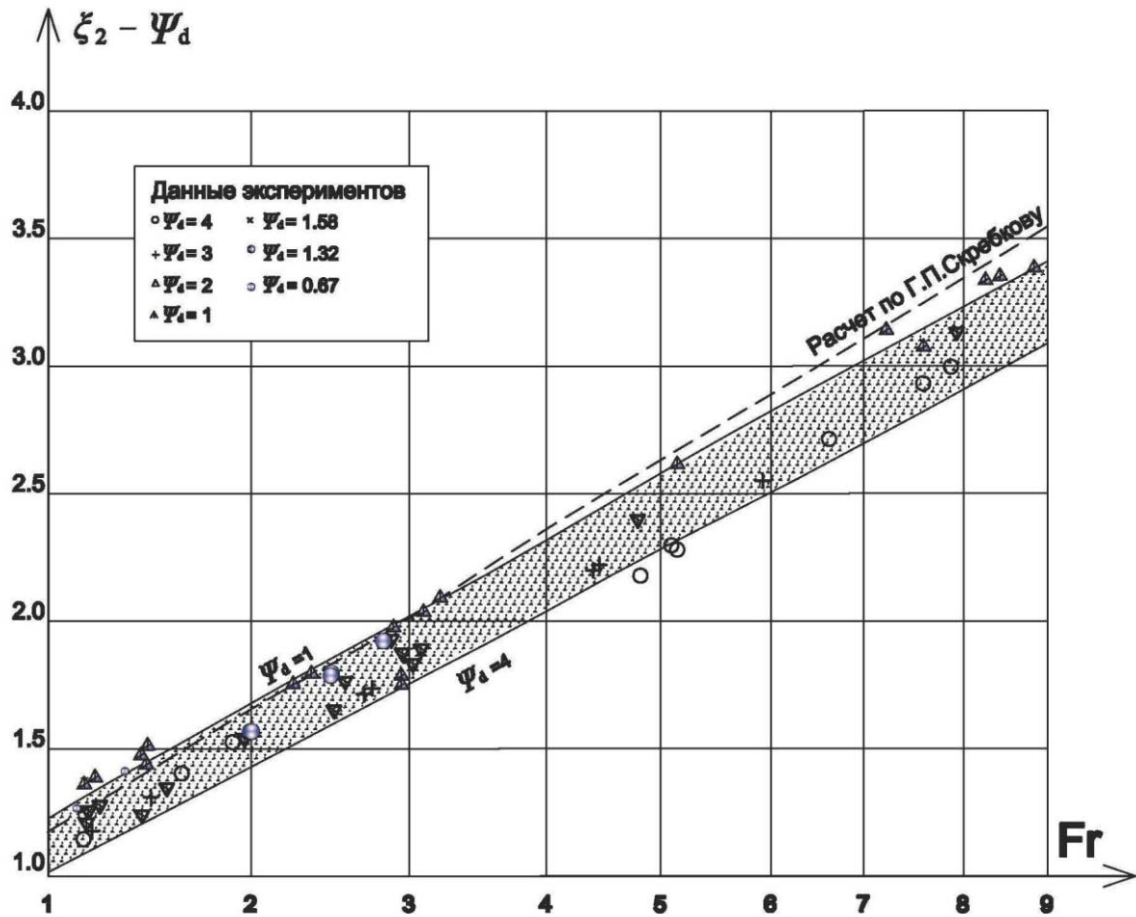


Рисунок 4. Сравнение экспериментальных данных и расчетных зависимостей по затоплению поверхностных режимов

Полученные экспериментальные данные и эмпирическая зависимость (3) хорошо согласуются (см. рис. 5).

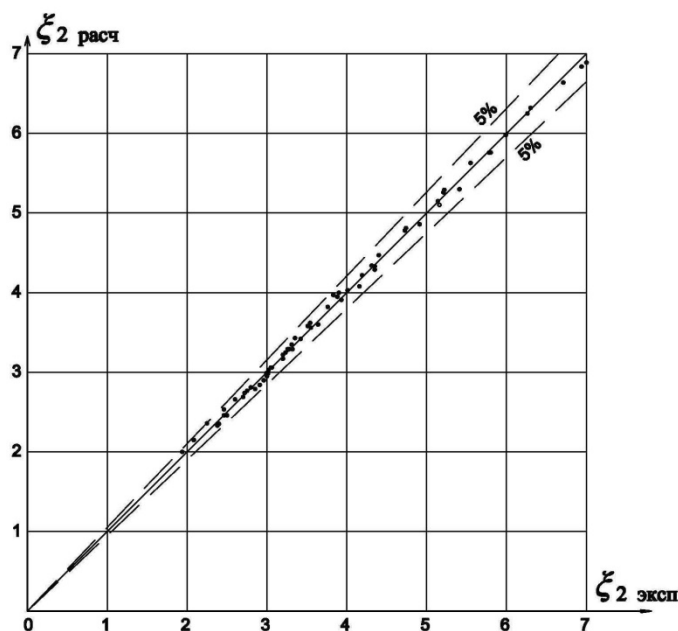


Рисунок 5. Сопоставление данных по зависимости (4.2) с данными экспериментов при затоплении поверхностных режимов

Образование поверхностно-донного режима зарегистрировано в 19 опытах, поэтому нельзя говорить о достаточной статистической точности обработки результатов.

Появление поверхностно-донного режима отмечено во всем диапазоне исследованных высот уступа. В результате опытов установлено, что при $Fr < 2,4$ в исследованном диапазоне высот поверхностно-донный режим не образуется.

Сравнение полученных экспериментальных данных с зависимостями из ранее проведенных исследований М.Ф. Складнева [17] и Г.П. Скребкова [18] показало качественное совпадение (см. рис. 6). Но в исследованном диапазоне расчеты по [17] и [18] дают значительно завышенные данные по отношению к данным экспериментов настоящей работы.

Устойчивая зависимость получена только для $\psi_d = 1$ (6 точек) в виде

$$\xi_{2кpIII} = 2.122 * Fr^{0.307} + 0.01. \quad (4)$$

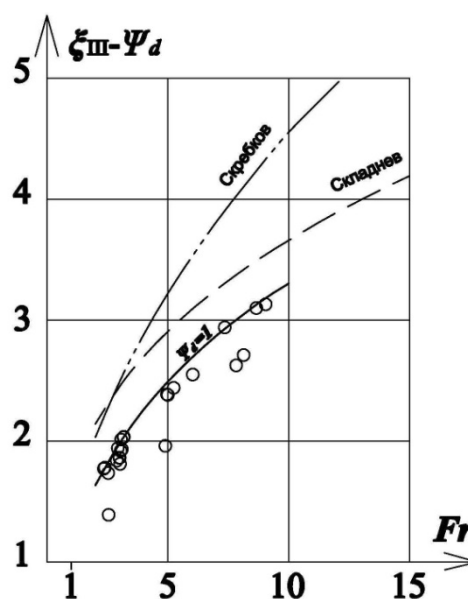


Рисунок 6. Сравнение экспериментальных данных по образованию поверхностно-донного режима

Выводы

Проведенное сравнение расчетных зависимостей различных исследователей показало, что они имеют значительное расхождение между собой, что вызывает трудности при их использовании в гидравлических расчетах. В результате проведенных экспериментов при $0,66 \leq \psi_d \leq 4$; $1,2 \leq Fr \leq 9$ в плоских условиях установлено следующее.

1. В результате обработки экспериментальных данных получены эмпирические зависимости по расчету верхней границы образования (1) поверхностного режима и затопления поверхностного или поверхностно-донного режимов (3).
2. Представлена качественная зависимость по оценке величины гидродинамического гистерезиса между верхней и нижней границами образования поверхностного режима (2).

3. Экспериментально установлено, что поверхностно-донный режим не образуется при $Fr < 2.4$.

4. Расчетные зависимости Г.П. Скребкова и М.Ф. Складнева по определению глубины в нижнем бьефе при образовании поверхностно-донного режима в исследованном диапазоне дают значительно завышенные значения по отношению к результатам экспериментов, проведенных автором.

Литература

1. Сабанеев А.А. О форме сопряжения водосливной поверхности плотины с дном нижнего бьефа // Труды МИИГ. 1929. Вып. XI. С. 241-262.
2. Беляшевский Н.Н. Сопряжение бьефов за водосливными плотинами носком. Киев: Изд-во АН УССР, 1953. 206 с.
3. Беляшевский Н.Н., Пивовар Н.Т., Калантыренко И.И. Расчеты нижнего бьефа за водосбросными сооружениями на нескальных основаниях. Киев: Наукова думка, 1973. 292 с.
4. Слиссский С.М. Гидравлика зданий гидроэлектростанций. М.: Энергия, 1970. 424 с.
5. Тараимович И.И. Удельные расходы на водосливе и рисберме // Гидротехническое строительство. 1958. №5. С. 22-24.
6. Bodea S. The Motion of a Fluid in an Open Channel // Ann. Scuola Norm. Sup. Pisa Cl. Sci. 2006. Vol. 5. No.5. Pp. 77-105.
7. Chanson H. The hydraulics of open channel flow: an introduction. Second edition. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, Linacre House, 2002. 585 p.
8. Khatsuria R.M. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. New York, 2005. 649 p.
9. Chow V.T. Open channel hydraulics. New York: McGraw – Hill Book Company, 1959. 204 p.
10. Forbes L.K., Schwartz L. Free-surface flow over a semicircular obstruction // Journal of Fluid Mechanics. 1982. No. 114. Pp. 299-314.
11. Chaudhry M.H. Open-channel flow. Columbia, 2008. 523 с.
12. Moore W.L., Morgan C.W. The hydraulic jump at an abrupt drop // Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division. 1957. Vol. 83. No. HY6. Paper 1449.
13. Ferreri G.B., Nasello C. Hydraulic jumps at drop and abrupt enlargement in rectangular channel // Journal of Hydraulic Reseach. 2002. Vol. 40. No. 4. Pp. 491-505.
14. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений. Справочное пособие. М., 1988. 624 с.
15. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М.: Энергия, 1974. 313 с.
16. Слиссский С.М. Критические глубины нижнего бьефа за водосбросами с уступом. Плоская задача // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1985. Т. 179. С. 34-42.
17. Складнев М.Ф. О границах критических режимов поверхностного прыжка // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1958. Т. 58. С. 64-84.
18. Скребков Г.П. Расчет критических режимов за водосбросными сооружениями с уступом // Труды МЭИ. Вып. XXXVI. Гидравлика и гидротехнические сооружения. М.: МЭИ, 1961. С. 91-102.
19. Иванов В.М., Каверин А.А. Универсальная модель для изучения течения за уступом. Информационный листок №1026-85, ЛенЦНТИ. Л., 1985. 2 с.
20. Кузьмин С.А. О критических режимах поверхностного гидравлического прыжка // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1983. Т. 168. С. 86-91.
21. Каверин А.А., Миркин М.А., Пичугин Ю.А. К вопросу о гидродинамическом гистерезисе // Научная сессия ГУАП. Часть 1. Сборник докладов. СПб., 2011. С. 121-122.

* Александр Александрович Каверин, Санкт-Петербург, Россия

Тел. раб.: +7(920)298-67-00; эл. почта: kaverin2004@mail.ru

© Каверин А.А., 2013

doi: 10.5862/MCE.37.9

Experimental results on flow rates' changing limits behind the step spillway

A.A. Kaverin,*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(920)298-67-00; e-mail: kaverin2004@mail.ru*

Key words

step flow; step spillway; surface flow conditions; bottom flow conditions; experimental research

Abstract

Step spillway flow phenomenon is known for about 100 years. Subject of special interest in terms of application in engineering practice is the change of submerged bottom flow conditions for step spillway and surface flow conditions when depth behind the step spillway is increasing.

In reference literature and scientific publications there are often theoretical and empirical dependences of determining hydraulic depth, corresponding to flow rates' changing limits behind the downstream by step. But empiric formulas have clear range of application.

Results of experimental findings on investigation of flow rates' changing limits (plane problem) behind the downstream by step spillway, taking into account small Froude numbers, are given. Experiments were carried out on hydraulic model. The empirical dependences for upper limit evaluating the formation of surface flow conditions and submergence of surface and surface-bottom flow conditions are obtained. Dependences are in line with experimental findings.

References

1. Sabaneev A.A. *Trudy MIIG*. 1929. Issue XI. Pp. 241–262 (rus)
2. Belyashevskiy N.N. *Sopryazhenie biefov za vodoslivnymi plotinami noskom* [Levels' conjunction behind spillway dams with lip weir]. Kiev: Izd-vo AN USSR, 1953. 206 p. (rus)
3. Belyashevskiy N.N., Pivovar N.T., Kalantyrenko I.I. *Rasschety nizhnego biefa za vodozbrosnymi sooruzheniyami na neskalnykh osnovaniyakh* [Calculations of tailwater generated behind discharge structures, located on non-rock foundations]. Kiev: Naukova dumka, 1973. 292 p. (rus)
4. Slissky S.M. *Gidravlika zdaniy gidroelectrostanciy* [Power dam hydraulics]. Moscow: Energiya, 1970. 424 p. (rus)
5. Taraimovich I.I. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 1958. No.5. Pp. 22–24 (rus)
6. Bodea S. The Motion of a Fluid in an Open Channel. *Ann. Scuola Norm. Sup. Pisa Cl. Sci.* 2006. Vol. 5. No.5. Pp. 77–105.
7. Chanson H. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. Second edition. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, Linacre House, 2002. 585 p.
8. Khatsuria R.M. *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. New York, 2005. 649 p.
9. Chow V.T. *Open channel hydraulics*. New York: McGraw – Hill Book Company, 1959. 204 p.
10. Forbes L.K., Schwartz L. Free-surface flow over a semicircular obstruction. *J.Fluid Mech.* 1982. No.114. Pp. 299–314.
11. Chaudhry M.H. *Open-channel flow*. Columbia, 2008. 523 p.
12. Moore W.L., Morgan C.W. The hydraulic jump at an abrupt drop. *Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division*. 1957. Vol. 83. No.HY6. Paper 1449. Pp. 1–21.
13. Ferreri G.B., Nasello C. Hydraulic jumps at drop and abrupt enlargement in rectangular channel. *Journal of Hydraulic Reseach*. 2002. Vol. 40. No.4. Pp. 491–505.
14. *Gidravlicheskiye rasschety vodozbroznykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh* [Hydraulic calculations for hydraulic engineering structures]. Reference guide. Moscow, 1988. 624 p. (rus)
15. Kiselev P.G. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Hydraulic calculations guide]. Moscow: Energiya, 1974. 313 p. (rus)
16. Slissky S.M. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva*. 1985. Vol. 179. Pp. 34–42. (rus)

17. Skladnev M.F. *Izvestiya VNIIG im. Vedeneeva*. 1958. Vol. 58. Pp. 64–84. (rus)
18. Skrebkov G.P. Trudy MEI. Issue XXXVI. *Gidravlika I gidrotechnicheskie sooruzheniya*. Moscow: MEI, 1961. Pp. 91–102. (rus)
19. Ivanov V.M., Kaverin A.A. *Universalnaya model dlya izucheniya techeniya za ustupom* [General investigation model of downstream by step]. Release bulletin No.026-85, LenTsNTI. Leningrad, 1985. 2 p. (rus)
20. Kuzmin S.A. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva*. 1983. Vol.168. Pp. 86–91 (rus)
21. Kaverin A.A., Mirkin M.A., Pichugin Yu.A. *K voprosu o gidrodinamicheskom gisteresise* [Towards hydrodynamic hysteresis effect]. GUAP scientific session. Part 1. The Reports. Saint- Petersburg, 2011. Pp. 121–122. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 62–66