

На правах рукописи

Каверин Александр Александрович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО РЕЖИМА
ТЕЧЕНИЯ ПРИ МАЛЫХ ВЫСОТАХ УСТУПА

Специальность 05.23.16 — гидравлика и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
АРЕФЬЕВ НИКОЛАЙ ВИКТОРОВИЧ

Официальные оппоненты:

ПЕТРИЧЕНКО МИХАИЛ РОМАНОВИЧ

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой гидравлики
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

ИВАНОВ ТИМОФЕЙ СТЕПАНОВИЧ

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Открытое акционерное общество «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева»
(г.Санкт-Петербург)

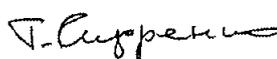
Ведущая организация: «ЛЕНГИДРОПРОЕКТ», институт ОАО

Защита состоится «10» декабря 2013 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, аудитория 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор технических наук



Сидоренко Геннадий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В Федеральном законе РФ «О безопасности гидротехнических сооружений», принятом Государственной Думой, указано, что для безопасности жизни, здоровья и законных интересов людей, окружающей среды и хозяйственных объектов необходимо повышать качество и уровень научных исследований. До последнего времени недостаточно исследованными оставались вопросы о структуре потока при отрывных режимах течения воды за водосбросами с уступом и о воздействии такого потока на сооружения, что не отвечало требованиям безопасности гидротехнических сооружений. Приводимые в технической литературе расчетные формулы С.М.Слисского, М.Ф.Складнева, Г.П.Скребкова при малых числах Фруда и малых высотах уступа обнаруживают существенные расхождения между собой и с результатами экспериментов, в связи с чем практическое использование этих формул затруднено. Таким образом, несмотря на многочисленные исследования поверхностного режима течения, существуют вопросы, решение которых на настоящий момент нельзя считать удовлетворительным.

В связи с этим представляется актуальным экспериментальное и теоретическое исследование проблемы отрывных течений за уступом со свободной поверхностью.

Цели работы

Целью настоящей работы является разработка на основе экспериментальных и теоретических исследований современных методов расчета и обоснованных математических расчетных зависимостей, которые позволят определить параметры потока при течении за уступом со свободной поверхностью. А это способствует достижению оптимального выбора режима течения за уступом, определению нагрузки на сооружения и конструкции и повышению точности расчетов и, соответственно, безопасности конструкций и сооружений.

Постановка новых задач потребовала проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований, выполненных на модели с различными режимами

течения потока за уступом и обработкой полученных результатов в соответствии с принципами математической статистики. В теоретической части исследований при выводе расчетных зависимостей использовались классические методы гидромеханики.

Научная новизна

Впервые математически обосновано понятие минимальной высоты уступа, обеспечивающей условие создания поверхностного режима течения. В результате проделанной работы с использованием современных методов статистической обработки экспериментальных результатов найдены эмпирические зависимости. Полученные новые экспериментальные данные представлены в виде расчетных формул и графиков, которые позволяют определить параметры течения в условиях плоской задачи границы смены режимов и давление под уступом.

Практическая и теоретическая ценность. Практическая ценность работы определяется полученными экспериментальными закономерностями границ смены режимов течения за уступом, выявлением влияния геометрических и кинематических характеристик потока на величину донного давления.

Теоретическая ценность работы состоит в выявлении связи поверхностного режима течения с донным гидравлическим прыжком. Математически обосновано понятие минимальной высоты уступа, обеспечивающей появление поверхностного режима течения.

Результаты работы использованы при проектировании водопропускных сооружений Нижне-Бурейского гидроузла на р. Бурей и при гидравлических расчетах Верхне-Омского гидроузла на р.Обь.

Достоверность результатов. Экспериментальные исследования, результаты которых приведены в работе, выполнены на современном гидравлическом стенде автором. Выполнена экспериментальная проверка моделируемости отрывных течений по критерию Фруда. Оценка погрешности прямых и косвенных измерений в среднем

находится в пределах 5-7%, что позволяет сделать заключение о статистической достоверности полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1) На основе статистической обработки экспериментальных данных предложены зависимости по определению границ смены режимов течения.

2) Математическая модель и результаты экспериментальных исследований по определению координат свободной поверхности потока за уступом.

3) Теоретически и экспериментально определена граница затопления поверхностных режимов и минимальная высота уступа, обеспечивающие возможность создания поверхностных режимов и расчет донного давления.

4) Расчетные зависимости, обоснованные результатами экспериментальных исследований по определению донного давления за уступом при поверхностном режиме течения.

Апробация работы. Основные разделы работы докладывались: - на научных семинарах кафедры гидроупругости и гидроаэродинамики СПбГУ, кафедры гидротехнических сооружений СПбГПУ, кафедры гидравлики и ГТС ННГАСУ, научной сессии ГУАП и Всесоюзной научно-технической конференции «Научные проблемы современного энергетического машиностроения и их решение» г.Ленинград, 1987 г.

Публикации. Результаты научных исследований опубликованы в 5 печатных работах, в том числе в 3 статьях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы, содержащего 115 наименований. Текст работы изложен на 115 страницах. Диссертация содержит 35 рисунков и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность темы об определении экспериментального и теоретического исследования режимов течения за уступом, обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цели и задачи исследования.

Первая глава содержит анализ современного состояния изучаемого вопроса. В разделе связанном с имеющимися теоретическими и экспериментальными исследованиями в области затопленных и пристенных струй, рассмотрены работы Г.Н.Абрамовича, М.И.Гуревича. В области расчетов отрывных течений рассмотрены работы Л.В.Гогиша, Н.Ф.Краснова, Л.И.Седова, Г.Ю.Степанова, П.Чжена. В области гидравлических работ сделан обзор теоретических работ М.А.Михалева, С.М.Слисского, С.А.Кузьмина, Д.И.Кумина, М.Р.Петриченко, Т.С.Иванова. Рассмотрены экспериментальные исследования Т.Н.Астафичевой, Н.Н.Беляшевского, Д.И.Кумина, Г.П.Скребкова, М.Ф.Складнева, П.М.Степанова.

Обзор литературных источников показывает недостаточность сведений о границах смены режимов при малых числах Фруда. Проведенный анализ показывает необходимость дальнейшего изучения поверхностного режима за водосбросами с уступом.

Во второй главе изложены аналитические результаты исследования параметров течения со свободной поверхностью за уступом.

Движение жидкости со свободной поверхностью при сходе с уступа происходит под действием сил инерции, донного давления и турбулентного трения. Схема течения приведена на рис. 1.

Равномерный поток идеальной жидкости глубиной h_1 движется с уступа высотой d . Средняя скорость потока на сходе с уступа V_1 . Параметр кинетичности потока на сходе с уступа $Fr=V_1^2/gh_1>1$. Донное давление на дне потока под уступом обозначим P_d , а давление под струей на уровне плоскости уступа - P_0 . Т.е. $P_0 = P_d - \gamma d$, где γ -

удельный вес воды. На удалении от уступа поток становится спокойным $Fr < 1$. Предполагаем, что эпюра скорости вдали соответствует режиму равномерного течения, коэффициент Буссинеска в обоих сечениях равен 1; потери на турбулентное трение в рассматриваемом объеме жидкости малы; распределение давления по уступу подчиняется линейному закону; распределение давления в конечном сечении подчиняется гидростатическому закону. При построении математической модели течения начальное сечение рассматриваемого отсека жидкости отодвигаем от кромки уступа в сеч. 1-1 (см. рис. 1) и считаем, что распределение давления по высоте в этом сечении подчиняется гидростатическому закону.

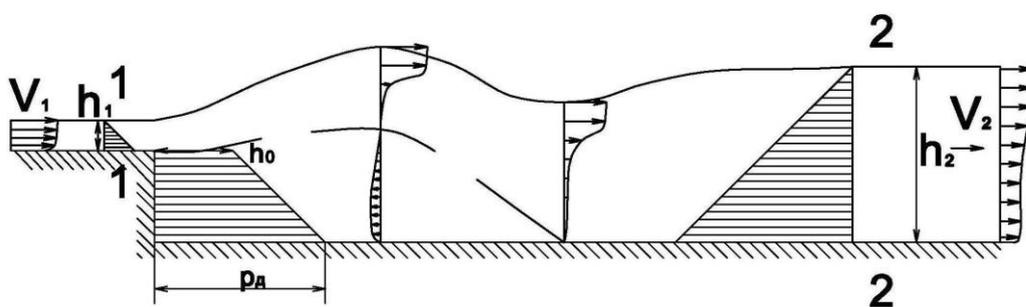


Рис. 1. Схема течения за уступом.

Горизонтальная проекция уравнения количества движения отсека жидкости с учетом уравнения неразрывности между сечениями 1-1 и 2-2 имеют вид:

$$\psi_d^2 + 2 \psi_d \xi_0 = 2 Fr / \xi_2 + \xi_2^2 - 2 Fr - 1 \quad (1)$$

где - $\psi_d = d/h_1$ – относительная высота уступа; $\xi_2 = h_2/h_1$ – относительная глубина в сечении 2-2; $\psi_p = p_d / (\gamma h_1)$ – относительное давление на дно за уступом; $\xi_0 = h_0 / (\gamma h_1) = \psi_p - \psi_d$; $Fr = V_1^2 / (g h_1)$ – число Фруда на сходе потока с уступа; h_1, V_1 – глубина и средняя скорость потока на уступе; h_2, V_2 – глубина и средняя скорость потока в конце расчетного отсека; d – высота уступа.

Как известно, давление под струей за счет ее эжектирующего действия всегда меньше, чем давление потока на дно в удалении от уступа. Т.е. $(\xi_2 - \psi_p) > 0$. По физическому смыслу на уравнение (1) накладываются ограничения:

$$\psi_d \geq 0; Fr \geq 1; \xi_2 > 0. \quad (2)$$

Произведем замену переменных в уравнении (1) относительно η - глубины нижнего бьефа, отсчитываемой от уступа вверх, $\eta = \xi_2 - \psi_d$. Тогда уравнение (1) преобразуется к виду:

$$2\psi_d^2(\eta - \xi_0) + \psi_d(3\eta^2 - 2\eta\xi_0 - 2Fr - 1) + (\eta - 1)(\eta^2 + \eta - 2Fr) = 0 \quad (3)$$

Полученное уравнение (3) является квадратным относительно ψ_d и должно в силу наложенных ограничений (2) иметь два действительных корня:

$$\psi_d = (-\mathbf{B} \pm \sqrt{\mathbf{B}^2 - 4\mathbf{A}\mathbf{C}}) / 2\mathbf{A}; \quad (4)$$

$$\text{где } \mathbf{A} = 2(\eta - \xi_0); \mathbf{B} = 3\eta^2 - 2\eta\xi_0 - 2Fr - 1; \mathbf{C} = (\eta - 1)(\eta^2 + \eta - 2Fr).$$

Для того, чтобы уравнение (4) имело действительные корни достаточно потребовать выполнения неравенства $4\mathbf{A}\mathbf{C} \leq 0$

Раскрывая значения \mathbf{A} и \mathbf{C} , получим:

$$(\eta - \xi_0)(\eta - 1)(\eta^2 + \eta - 2Fr) \leq 0 \quad (5)$$

Данное неравенство имеет два решения:

$$1. \quad 1 \leq \eta \leq \frac{1}{2}(\sqrt{8Fr+1}-1); \quad 2. \quad \eta \leq -\frac{1}{2}(\sqrt{8Fr+1}-1)$$

Второе решение не отвечает ограничениям (2), т.к. видно, что при $\psi_d \rightarrow 0$ получим $\xi_2 < 0$, а это противоречит физическому смыслу. Тогда остается одно решение, которое перепишем в виде:

$$\psi_d + 1 \leq \xi_2 \leq \psi_d + \frac{1}{2}(\sqrt{8Fr+1}-1) \quad (6)$$

Решение (6) определяет границы существования действительных решений уравнения (1). В полученном решении одна из границ неравенства (6) соответствует границе затопления поверхностных режимов. Это условие

$$\xi_2 = \psi_d + \frac{1}{2}(\sqrt{8Fr+1}-1) \quad (7)$$

Полученное решение (7) показывает связь поверхностного и донного режимов, т.к. при $\psi_d = 0$ уравнение оно переходит в известное в инженерной гидравлике решение, связывающее первую и вторую сопряженные глубины донного гидравлического прыжка. Т.е. уравнение (1) является более общим случаем перехода течения из бурного состояния в спокойное.

Рассмотрим движение отсека жидкости со свободной поверхностью на сходе с уступа (см.рис.2). На уступе поток считаем равномерным, давление в нем распределено по гидростатическому закону. За малый промежуток времени отсек высотой h_l и длиной l переместится в сечение 2-2. На дно этого отсека начинает действовать донное давление P_0 и силы турбулентного трения S . Перепад давления $P_{из}$ на дно отсека составит $P_{из} = P_0 - \gamma h_l$. Если $P_{из} < 0$ поток будет отклоняться вниз, а если $P_{из} > 0$, то вверх.

Так как в пределах струи давление по высоте распространяется по гидростатическому закону, то сверху на низ струи будет действовать давление γh , где h - текущая толщина струи. Тогда для тонкой струи на отсек жидкости бесконечно малой высоты dh при $h \rightarrow 0$ на свободной поверхности будет действовать только давление со стороны донной области, которое можно выразить зависимостью:

$$P(x,y) = P_0 - \gamma Y(x,y)$$

Если ввести обозначение $h_{из} = P_0/\gamma - h_l$, где $h_{из}$ - избыточное давление, действующее из донной области на струю, то давление $P(x,y)$, направленное ортогонально траектории движения, на отсек жидкости на свободной поверхности можно выразить, как

$$P(x,y) = \gamma (h_{из} - Y). \quad (8)$$

На начальном участке расширения струи, длиной $\approx 10 h_l$, скорость на свободной поверхности постоянна, т.е. можно принять $V_1 = \text{const}$. Из условия постоянства скорости на свободной поверхности потока и схемы действия сил (см.рис.2.) получаем:

$$U_y/U_x = \text{tg}\alpha; \quad \sin\alpha = U_y / (\sqrt{U_x^2 + U_y^2}); \quad \cos\alpha = U_x / (\sqrt{U_x^2 + U_y^2}).$$

$$P_x/P_y = dU_x/dU_y = -\text{tg}\alpha; \quad (9)$$

Из вышеизложенного следует, что

$$U_x \cdot dU_x + U_y \cdot dU_y = 0 \quad (10)$$

Это дифференциальное уравнение с разделенными переменными, решением которого является $U_x^2 + U_y^2 = C_1$. Из начальных условий найдем, что $C_1 = U_0^2$.

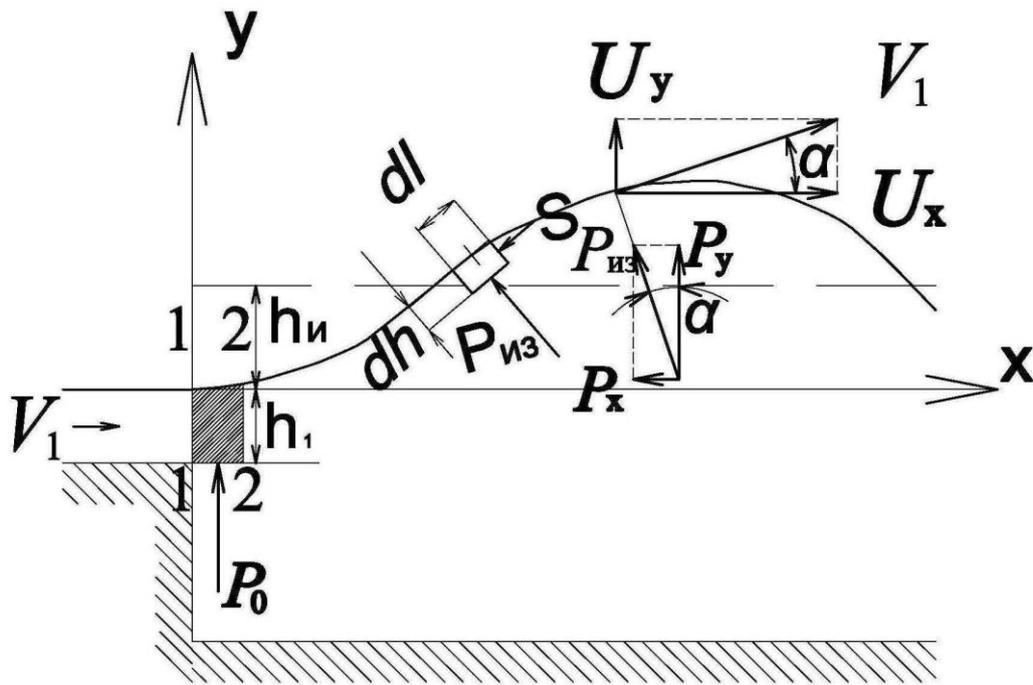


Рис.4. Схема действия сил

Рассматривая динамическое равновесие в точке, где касательная к траектории движения имеет угол наклона к горизонту α , получим

$$m \cdot a_x = dU_x/dx = -c(h_n - Y)/U_0 \cdot dy/dx; \quad (11)$$

Решение этого уравнения позволило найти координаты свободной поверхности струи в виде

$$X = \frac{|h_n|}{2K} [2E(K, \theta) - F(K, \theta)]. \quad (12)$$

$$Y = h_n \pm \sqrt{h_n^2 - 2 \frac{U_0^2}{c} \{1 - \cos[2 \arcsin(K \sin \theta)]\}} \quad (13)$$

Где $F(K, \theta) = \int \frac{d\theta}{\sqrt{1 - K^2 \sin^2 \theta}}$; $E(K, \theta) = \int \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \theta} \cdot d\theta$ - эллиптические

интегралы I и II рода в форме Лежандра; $\eta_n = h_n/h_1$; $K = \eta_n/(2\sqrt{Fr})$; $c = g/h_1$

$$\theta = \arcsin \left\{ \frac{1}{K} \sin \left[\frac{\arccos \left(\frac{c \cdot Y^2}{2U_0^2} - \frac{c \cdot h_n \cdot Y}{U_0^2} + 1 \right)}{2} \right] \right\} = \arcsin \sqrt{\frac{Y(2h_n - Y)}{h_n^2}} \quad (14)$$

Сравнение результатов расчета по формулам (12), (13) и (14) с экспериментальными данными, приведенными в главе 4 и в приложениях, на рис.3. показывает хорошее согласование на участке гребня 1-ой волны.

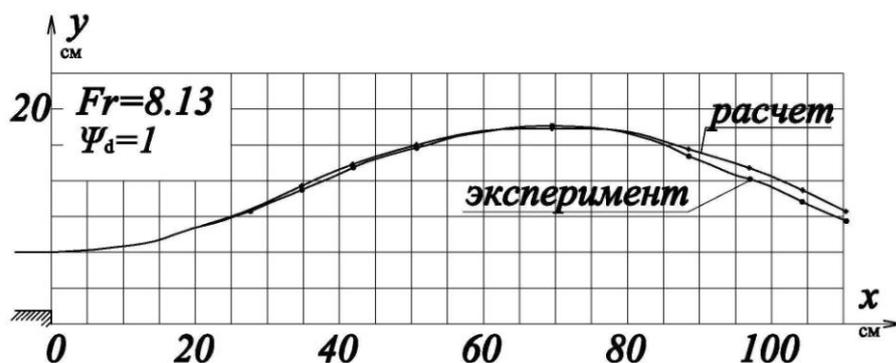


Рис. 3. Свободная поверхность потока по результатам расчетов и эксперимента

В третьей главе изложены задачи и методика исследований. Сделано описание установки для проведения экспериментов. Моделирование гидравлических процессов велось по критерию $Fr=idem$. В качестве характерного геометрического размера при изучении смены режимов принята толщина струи на сходе с уступа, а при измерении длины водоворота – высота уступа. Толщина струи на сходе с уступа была 8, 10 и 12 см. Высота уступа изменялась от 6 до 32 см. В процессе проведения экспериментов фиксировались глубины, соответствующие границам смены режимов, скорости воды в характерных сечениях, распределение давления по высоте уступа и по длине за уступом, длина водоворота в донной области. Обработка экспериментальных данных велась методом наименьших квадратов. Оценка погрешности эксперимента составила 1,7%.

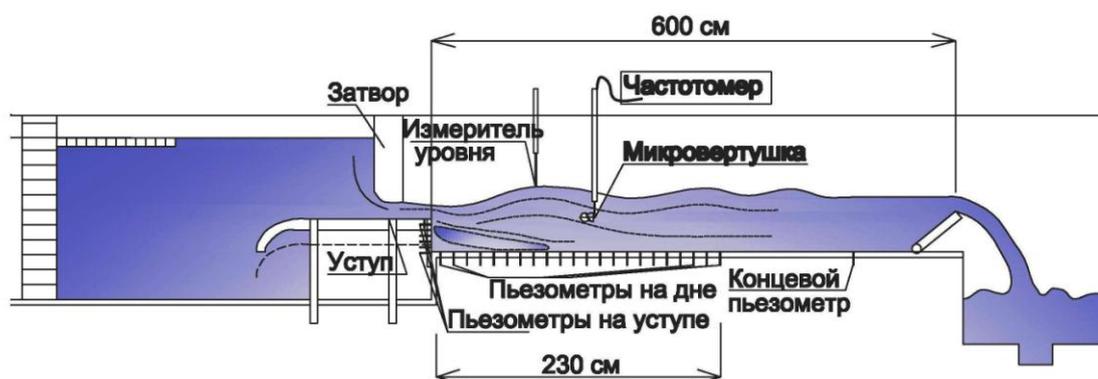


Рис.4. Схема гидравлической экспериментальной установки

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований. Опыты были проведены с целью определения границ смены режимов, определения донного давления за уступом и по уступу, изучения распределения давления по длине потока за уступом, изучения водоворота в придонной области. Всего было проведено 70 опытов по изучению течения за уступом. Параметры опытов приведены в приложении.

На основе проведенных экспериментов при $0,67 \leq \psi_d \leq 4$ и $1,2 \leq Fr \leq 9$ получены следующие эмпирические зависимости:

1. Глубину $\xi_{2крII}$ соответствующую границе затопления поверхностных режимов

$$\xi_{2крII} = A_1 (\psi_d + \frac{1}{2} (\sqrt{8Fr+1} - 1)) + B_1, \quad (15)$$

где, $A_1 = -0,01448 \psi_d + 0,79371$; $B_1 = 0,22256 \psi_d + 0,45$.

2. Глубину $\xi_{2крI}$ соответствующую верхней границе образования поверхностного режима.

$$\xi_{2крI} = 1 + \psi_d + A_2 Fr + B_2, \quad (16)$$

где, $A_2 = -0,02486 \psi_d + 0,26648$; $B_2 = 0,03539 \psi_d^2 - 0,34711 \psi_d - 0,245$

Полученные эмпирические зависимости (15) и (16) хорошо согласуются с данными экспериментов и качественно с исследованиями Г.П.Скребкова (см.рис.5).

3. В результате проведенных экспериментов выявлена качественная зависимость величины гидродинамического гистерезиса

$$\Delta \xi_2 = (h_{6l} - h_{нl}) / h_l = (0.0614 \psi_d^2 - 0.076 \psi_d + 0.414) / Fr \quad (17)$$

4. В результате обработки экспериментальных данных о величине донного давления получена эмпирическая зависимость в виде:

$$P_0 = A_3 * P_{расч} + B_3, \quad (18)$$

где $A_3 = -0,007284 \psi_d^2 + 0,0855 \psi_d + 0,766$; $B_3 = (0,02532 \psi_d + 0,0272) Fr - 0,128 \psi_d + 0,479$

$$P_{расч} = (2 Fr / \xi_2 + \xi_2^2 - 2 Fr - 1 - \psi_d^2) / (\psi_d^2).$$

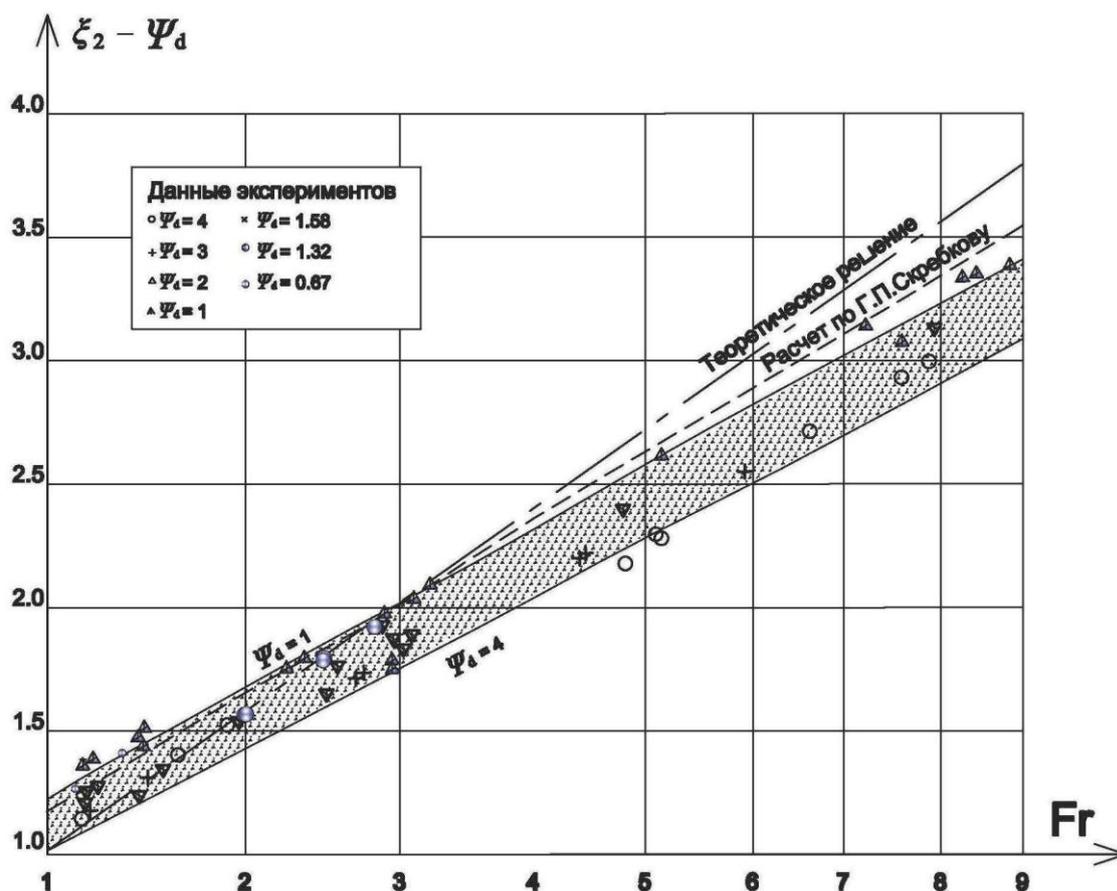


Рис.5. Сравнение данных экспериментов по затоплению поверхностных режимов с эмпиричесрассчетными зависимостями.

5. Наличие двух корней при анализе решения уравнения (4), говорит о том, что при фиксированных значениях ξ_2 и Fr поверхностный режим существует в некоем диапазоне высот $\psi_{d \min} < \psi_d < \psi_{d \max}$. Меньшее значение этого диапазона соответствует границе образования поверхностных режимов, а большее – границе затопления. При $\psi_{d \min} = \psi_{d \max}$ существование поверхностного возможно только при единственном значении глубины нижнего бьефа. Т.е. при такой высоте уступа по мере увеличения глубины режим из донного затопленного переходит в поверхностный затопленный. Таким образом, минимальная высота уступа – это такая высота, при которой при определенном значении глубины нижнего бьефа возможно одновременно выполнение условий образования и затопления поверхностного режима. Т.е. выполняется условие $\psi_{d \min} = \psi_{d \max} = \psi_{d \text{пред}}$.

Полученный вывод позволяет определить значение $\psi_{d \text{ пред}}$ из данных экспериментальных данных. Решая совместно (26) и (27) выведена эмпирическая зависимость минимальной высоты уступа, обеспечивающей создание поверхностного режима течения:

$$\psi_{d \text{ пред}} = (\mathbf{B}_4 - \sqrt{\mathbf{B}_4^2 - 4\mathbf{A}_4\mathbf{C}_4}) / (2\mathbf{A}_4), \quad (19)$$

где, $\mathbf{A}_4 = 0,04987$; $\mathbf{B}_4 = 0,3706 + 0,02486Fr - 0,00724\sqrt{8Fr+1}$;

$\mathbf{C}_4 = 1,182 + 0,2665Fr - 0,38686\sqrt{8Fr+1}$.

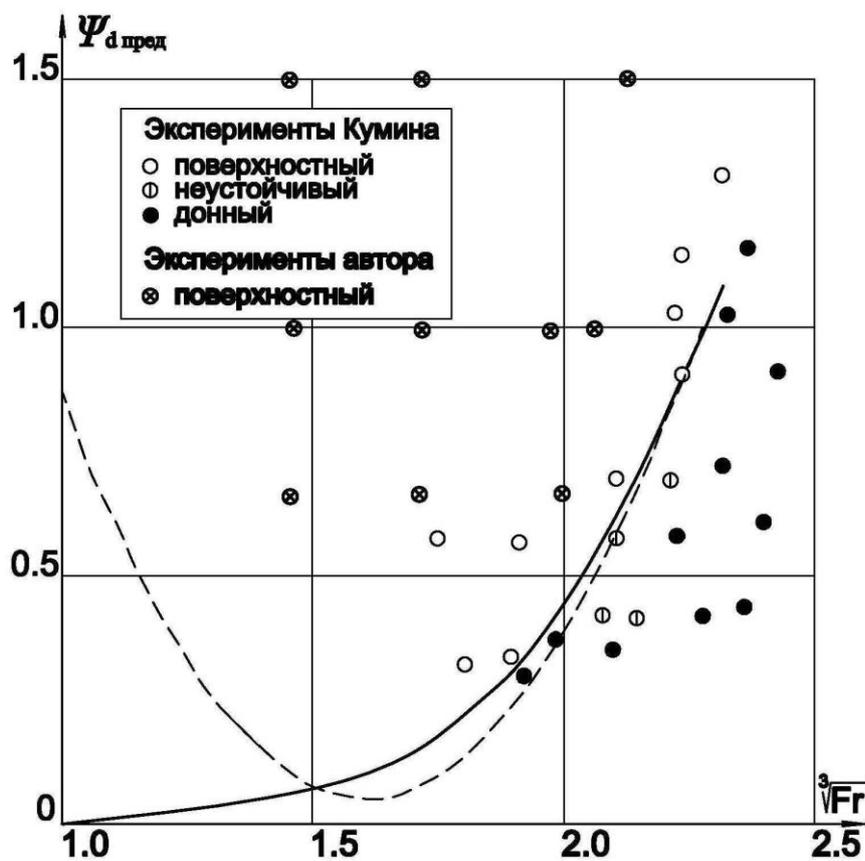


Рис.6. Сравнение данных расчета по (19) и (20) с данными экспериментов по определению минимальной высоты уступа.

Но для практических целей можно использовать более простую при вычислении зависимость, применимую при $1,5 \leq Fr \leq 12$.

$$\psi_{d \text{ пред}} = 0,008239 Fr^2 - 0,01436 Fr + 0,007. \quad (20)$$

Сравнение полученной зависимости с экспериментами автора и Д.И.Кумина (см.рис.6) показало хорошее совпадение.

В приложении представлена справка о внедрении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы:

1. Результатами экспериментальных исследований доказано и теоретически обосновано условие затопления поверхностного режима течения.
2. Получено аналитическое решение, позволяющие рассчитать координаты свободной поверхности потока.
3. На основании экспериментальных исследований найдены эмпирические зависимости для границ смены режимов течения.
4. Экспериментально исследован гидродинамический гистерезис на границе смены режимов течения.
5. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено значение минимальной высоты уступа, обеспечивающей образование поверхностного режима.

Диссертант выражает благодарность Миркину М.А. и Пичугину Ю.А. за конструктивные обсуждения результатов и полезные консультации.

Публикации

1. Каверин А.А. Комплекс аппаратуры для определения характеристик динамических процессов / А. А. Каверин, В. П. Подчернин // Научные проблемы современного энергетического машиностроения и их решение : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф., 28-29 янв. 1987 г. – Ленинград, 1987. – С. 30.
2. Каверин А.А. Универсальная модель для изучения течения за уступом / А. А. Каверин, В. М. Иванов // Информ. листок ЛенЦНТИ № 1026-85. – Ленинград, 1985. – С. 1-2.

3. Каверин А.А. К вопросу о гидродинамическом гистерезисе/ А.А.Каверин, М.А.Миркин, Ю.А.Пичугин // Научная сессия ГУАП. Сборник докладов. Санкт-Петербург. — 2011. — Часть 1. — С. 121-122.
4. Каверин А.А. Уравнение движения струи идеальной жидкости со свободной поверхностью за уступом/ А.А.Каверин // Приволжский научный журнал. — 2012. — № 3. — С. 42-48.
5. Каверин А.А. Результаты экспериментальных исследований границ смены режимов течения за уступом/ А.А.Каверин // Инженерно-строительный журнал. — 2013. — № 2. — С. 62-66.