

Оригинальная статья

УДК 556.535.3:681.121.842:627.8

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-98-105>

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПОГРЕШНОСТЬ РАСХОДОМЕРОВ С СУЖАЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

А.А. Наумова^{1✉}, А.В. Перминов², К. Джиллали³

^{1,2} ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация

³ Национальная высшая школа гидравлики (НВШГ) Алжир, улица Сумаа Блида

^{1,1} koshevaya81@mail.ru; orcid: 0000-0002-0373-8655

^{1,2} alexperminov@rgau-msha.ru; orcid: 0000-0003-2848-1793

^{2,3} d.kahlerras@ensh.dz; orcid: 0000-0002-4431-2159

Аннотация. Цель исследований – анализ факторов, определяющих погрешность измерения расхода воды расходомерами с сужающими устройствами (диафрагмами и мерными водосливами) в открытых потоках несжимаемой жидкости, применяемых в мелиоративных системах и на гидротехнических сооружениях, с особым вниманием к влиянию граничных условий эксплуатации (режима подтопления нижнего бьефа, подходной скорости потока, геометрических параметров каналов). В статье проводится анализ структуры градуировочной характеристики, выведенной на основе уравнения Бернулли и уравнения неразрывности, и оценивается влияние различных допущений, принятых при ее выводе. Рассматриваются водосливы с тонкой стенкой, водосливные пороги различного очертания, щелевые водосливы, лотки Вентури и Паршалла. Подчеркивается, что для сужающих устройств открытых потоков метрологическое обоснование погрешностей разработано недостаточно в отличие от напорных трубопроводов. Особое внимание уделяется недопустимости работы в подтопленном режиме, который вносит значительные дополнительные погрешности, делающие невозможным достижение нормативной точности измерений (0,25-1,0%). Показано, что применение эмпирических поправочных коэффициентов для учета влияния подтопления является неоправданным ввиду сложности воспроизведения многофакторных условий сопряжения бьефов. Делается вывод о том, что основным резервом повышения точности расходомеров являются применение более совершенных измерительных приборов, использование успокоительных устройств и строгий контроль граничных условий эксплуатации.

Ключевые слова: гидравлика открытых потоков, сужающее устройство, уравнение расхода, турбулентность потока, коэффициент Кориолиса, пульсационные скорости, потери напора

Для цитирования: Наумова А.А., Перминов А.В., Джиллали К. Анализ факторов, определяющих погрешность расходомеров с сужающими устройствами. Природообустройство. 2026;Т.19(1):98-105. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-98-105>

Original article

ANALYSIS OF FACTORS THAT DETERMINE THE ERROR OF FLOWMETERS WITH CONSTRICTION DEVICES

А.А. Naumova^{1✉}, А.В. Perminov², К. Djillali³

^{1,2} FGBOU VO Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; Moscow, Russian Federation

³ National Higher School of Hydraulics (NHS) Algeria, Sumaa Blida Street (École Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH) 29, route de Soumaa Blida, Algérie

^{1,1} koshevaya81@mail.ru; orcid: 0000-0002-0373-8655

^{1,2} alexperminov@rgau-msha.ru; orcid: 0000-0003-2848-1793

^{2,3} d.kahlerras@ensh.dz; orcid: 0000-0002-4431-2159

Abstract. The purpose of this work is to analyze the factors that determine the error in measuring water flow using flow meters with constrictive devices (diaphragms and measuring weirs) in open streams of incompressible liquid, which are used in land reclamation systems and hydraulic structures, with a special focus on the influence of boundary operating conditions (the flooding regime of the downstream, the approach flow velocity, and the geometric parameters of the channels). The article analyzes the structure

of the calibration characteristic derived from the Bernoulli equation and the continuity equation, and evaluates the impact of various assumptions made in its derivation. It considers thin-walled weirs, various-shaped weir thresholds, slot weirs, Venturi trays, and Parshall trays. The article emphasizes that, unlike for pressure pipelines, the metrological justification of errors is insufficient for open-flow constrictions. Special attention is paid to the inadmissibility of working in a flooded mode, which introduces significant additional errors that make it impossible to achieve the required accuracy of measurements (0.25-1.0%). It is shown that the use of empirical correction factors to account for the influence of flooding is unjustified due to the complexity of reproducing the multifactorial conditions of the downstream junction. It is concluded that the main way to improve the accuracy of flow meters is to use more advanced measuring instruments, use of damping devices, and strict control of the boundary operating conditions.

Keywords: open channel hydraulics, flow constriction device, discharge equation, flow turbulence, Coriolis coefficient, pulsation velocities, head loss

For citation: Naumova A.A., Perminov A.V., Dzhillali K. Analysis of factors that determine the error of flowmeters with constriction devices. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(1):98-105. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-98-105>

Введение. Современные подходы к описанию процессов истечения жидкости через локальные гидравлические сопротивления опираются на базовые положения гидромеханики и накопленный научный опыт. Представления о структуре потоков формировались по мере накопления результатов многочисленных теоретических и натурных исследований, отраженных в фундаментальных учебных и справочных изданиях [1-4]. Этот массив знаний обеспечивает приемлемую точность инженерных расчетов гидротехнических сооружений, транспортных водоводов, систем водоснабжения и энергетических объектов. Однако большинство зависимостей, связывающих характеристики потока с геометрическими свойствами сужающих элементов, носят полуэмпирический характер, что ограничивает их использование при решении метрологических задач. Если рассматривать сужающие устройства как составную часть измерительных систем, то упрощения, допустимые при инженерных расчетах, оказываются недостаточно обоснованными и требуют детального анализа.

Для сужающих элементов, применяемых в напорных трубопроводах (диафрагм, сопел и т.п.), подобные исследования уже проводились, и их результаты легли в основу действующих нормативных документов. В открытых потоках ситуация иная: вопросы, связанные с оценкой погрешностей таких устройств, проработаны неполно.

Цель исследований: анализ влияния граничных условий эксплуатации, в частности, режима подтопления, на точность измерения расхода воды сужающими устройствами и оценка возможности применения эмпирических поправочных коэффициентов для компенсации возникающих погрешностей.

В связи с поставленной целью представляется целесообразным последовательный анализ, включающий в себя: а) исследование структуры градуировочной зависимости для различных разновидностей сужающих устройств; б) рассмотрение влияния основных допущений, используемых при ее выводе; в) изучение воздействий внешних факторов и параметров измеряемой среды на точность определения расхода; г) оценку влияния отклонений геометрии элементов от проектных значений; д) определение погрешностей, возникающих вследствие характеристик применяемых измерительных приборов; е) формирование общей картины составляющих итоговой погрешности.

Материалы и методы исследований. При аналитическом описании связи между расходом и геометрическими характеристиками потока для любых типов сужающих устройств применяется совместное преобразование уравнения неразрывности и интеграла Бернулли. Эти выражения непосредственно следуют из законов сохранения массы и энергии [5] и служат базой для получения расчетных соотношений.

Для иллюстрации основного подхода обратимся к упрощенной расчетной схеме (рис. 1) и рассмотрим ситуацию медленно изменяющегося движения реальной жидкости в открытом русле конечной ширины с горизонтальным дном, где размещено сужающее устройство произвольной конфигурации.

Для анализа распределения энергии потока выделим два произвольных вертикальных сечения: I-I и II-II, располагающиеся в верхнем и нижнем бьефах сужающего устройства соответственно. Применим к этим сечениям обобщенную форму уравнения Бернулли, включающую в себя корректирующие члены, характеризующие

неравномерность скорости и пульсационные составляющие:

$$\begin{aligned} & \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + \eta_1 \frac{U_{n_1}^2}{2g} + \Theta \frac{U_{b_1}^2}{2g} = \\ & = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \eta_2 \frac{U_{n_2}^2}{2g} + \Theta \frac{U_{b_2}^2}{2g} + \sum \xi \frac{V_2^2}{2g}, \end{aligned} \quad (1)$$

где P_1 и P_2 – пьезометрические давления в обоих сечениях, кг/м²; γ – объемный вес жидкости, н/м³; V_1^2 и V_2^2 – продольные (актуальные) скорости потока, осредненные по сечениям I-I и II-II, м/с; α_1 и α_2 – безразмерные коррективы, учитывающие неравномерность поля продольных скоростей потока в обоих сечениях; U_{n_1} и U_{n_2} – осредненные продольные составляющие пульсационных скоростей потока в обоих сечениях, м/с; η_1 и η_2 – безразмерные коррективы, учитывающие неравномерность распределения продольных пульсационных скоростей в обоих сечениях; U_{b_1} и U_{b_2} – осредненные вертикальные составляющие пульсационных скоростей потока в обоих сечениях, м/с; Θ_1 и Θ_2 – безразмерные коррективы, учитывающие неравномерность распределения вертикальных пульсационных скоростей в обоих сечениях; $\sum \xi$ – сумма потерь энергии потока между сечениями I-I и II-II, м.

Для детализации процесса истечения введем дополнительное вертикальное сечение 0-0. Оно проходит через точку максимального сжатия струи, и его параметры обозначим как H_0 , V_0 и W_0 . На их основе определим два важных безразмерных параметра: Относительная площадь отверстия (модуль сжатия) $m = W_0 / W_j$; Коэффициент сжатия струи $\varepsilon = W_0 / W_2$.

С учетом этих определений выражение (1) может быть преобразовано в форму, служащую основой дальнейшего вывода градуировочного уравнения:

$$\begin{aligned} & V_0 W_0 = \\ & = \frac{\varepsilon W_0 \sqrt{2g(H-h)}}{\sqrt{\alpha_2 + K_{u_2}^n \cdot \eta_2 + K_{u_2}^b \cdot \dot{\varepsilon}_2 + \sum \xi - \varepsilon^2 m^2 (\alpha_1 + K_{u_1}^n \cdot \eta_1 + K_{u_1}^b \cdot \dot{\varepsilon}_1)}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Обозначим далее:

$$(\alpha_2 + \eta_2 \cdot K_{u_2}^n + \Theta_2 \cdot K_{u_2}^b) = \tau_2; \quad (3)$$

$$(\alpha_1 + \eta_1 \cdot K_{u_1}^n + \Theta_1 \cdot K_{u_1}^b) = \tau_1. \quad (4)$$

Тогда

$$Q = \frac{\varepsilon W_0 \sqrt{2g(H-h)}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \varepsilon^2 m^2\right) \tau_2 + \sum \xi}}, \quad (5)$$

где $K_{u_1}^n$; $K_{u_1}^b$ – коэффициенты для продольных и вертикальных пульсационных скоростей, соответствующие постоянные Т. Кармана.

Анализ структуры выражения (5) дает возможность выделить несколько принципиальных особенностей поведения расходомерных систем.

Для сужающих устройств, функционирующих в режиме свободного истечения, включая водосливы с тонкой стенкой, водосливные пороги прямоугольного, треугольного или трапециевидального очертания, а также целевые водосливы, лотки и аналогичные конструкции, влияние условий течения в нижнем бьефе на градуировочную характеристику практически отсутствует. В этом случае параметр τ_2 стремится к единице, что означает отсутствие влияния течения в нижнем бьефе на расчетную зависимость.

Если учесть, что суммарные энергетические потери формируются из потерь при входе в сужающее устройство, внутри него, при выходе, а также из потерь на гидравлическое трение вдоль участка между сечениями 0-0 и I-I, то градуировочная зависимость может быть представлена в следующем аналитическом виде:

$$Q = \frac{\varepsilon W_0 \sqrt{2g(H-h)}}{\sqrt{\left(1 + \frac{\lambda_0 l_0}{4R_0} + \frac{\lambda_n \cdot l_n \cdot \sqrt{m}}{4R_0} + \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{сж}} + \xi_{\text{вых}} - \tau_1 \cdot \varepsilon^2 \cdot m^2\right)}}, \quad (6)$$

где ε – коэффициент сжатия (или коэффициент стеснения) потока в суженном сечении; λ_n и λ_0 – соответственно коэффициенты гидравлического трения (коэффициенты Дарси) на участке отводящего канала от сечения I-I до 0-0 и в пределах сужающего устройства; l_n и l_0 – протяженность участка подводящего канала от сечения I-I до 0-0 и протяженность сужающего устройства в продольном направлении соответственно, м; R_0 – соответственно гидравлический радиус сужающего устройства в сжатом сечении, м; $\xi_{\text{вх}}$ – коэффициент потерь энергии потока на вход в сужающее устройство; $\xi_{\text{сж}}$ – коэффициент потерь энергии потока при истечении через сжатое сечение сужающего устройства; $\xi_{\text{вых}}$ – коэффициент потерь энергии потока при выходе из сужающего устройства.

Для турбулентного режима движения жидкости наиболее распространенной и теоретически обоснованной признана формула А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_s}{R} + \frac{68}{R_0} \right)^{0,25}. \quad (7)$$

При выводе формулы (6) использовано уравнение Бернулли, отображающее связь энергетических параметров потока жидкости в различных сечениях. Этот подход справедлив только при учете допущений, обусловленных различиями между реальными свойствами потока и упрощенной моделью, заложенной в расчетах. Основными из этих допущений является следующее: плотность жидкости принимается постоянной по сечению потока и во времени; сжимаемость жидкости принимается пренебрежимо малой; жидкость движется сплошным стабилизированным потоком, без образования разрывов; неравномерность распределения скоростей по сечению потока пренебрежимо мала; давление

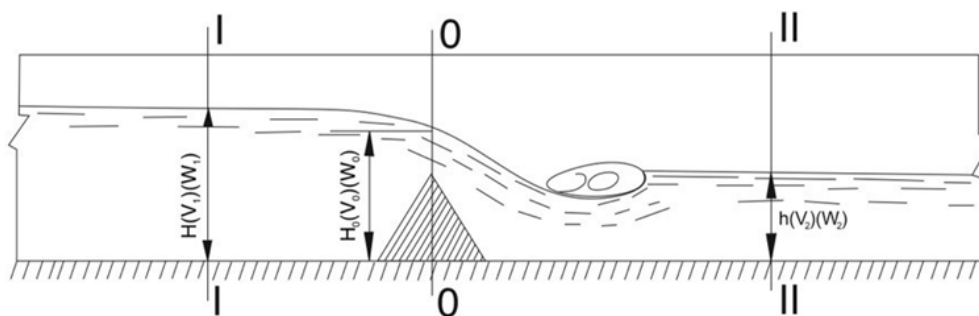


Рис. 1. Схема, поясняющая вывод градуировочного уравнения для сужающих устройств

Fig. 1. Diagram explaining the derivation of the calibration equation for constriction devices

по сечению потока распределяется по гидростатическому закону; механические свойства жидкости принимаются постоянными по сечению потока и во времени; ускорение силы тяжести принимается постоянным.

Изменение плотности и сжимаемости жидкости, возникающее под воздействием внешних условий и характерных режимов течения, может быть количественно определено на основе установленных физических закономерностей. Аналогичным образом допускается оценка влияния вариаций ускорения силы тяжести. Переменные свойства жидкости, в том числе вязкость, гидравлическое трение, поверхностное натяжение и сжимаемость, также поддаются учету при использовании законов гидромеханики и строго обоснованных значений эмпирических констант [6, 7].

Влияние неравномерности распределения местных скоростей и пульсационных характеристик в уравнении (6) учтено введением соответствующих переменных коэффициентов. Наконец, условие неразрывности потока соответствует реальной физической модели истечения через сужающее устройство.

Таким образом, определенная идеализация реального потока, допущенная при выводе исходной градуировочной характеристики (6), может быть с достаточной достоверностью компенсирована введением ряда коррективов и дополнительных составляющих погрешности.

Результаты и их обсуждение. Согласно данным источника [8] предельно допустимая погрешность эталонных расходомерных установок находится в интервале 0,10-1,50%. В диапазонах расходов, характерных для сужающих устройств, фактические значения достигаемой точности, исходя из анализа материалов по их аттестации, обычно укладываются в пределы 0,25-1,0%.

Для образцовых уровнемерных комплексов – таких, как УУО-Н-1 и УУО-Н-2,5, нормативная абсолютная погрешность согласно данным [9] составляет 0,3-1,0 мм. Это соответствует

относительной погрешности определения уровней воды, характерной для условий эксплуатации сужающих устройств, порядка 0,10-0,30%, включая составляющую, связанную с привязкой отсчетов уровня к условным отметкам расходомеров.

Вариация экспериментальных данных при неизменных условиях окружающей среды и жидкости может быть вызвана только нестабильностью потока на расходомерной установке и влиянием пульсаций уровней жидкости в процессе измерений. В случае применения в составе образцовых расходомерных установок газовых или многоступенчатых гидравлических стабилизаторов, конструкции которых уже достаточно отработаны, погрешность ввиду отсутствия стабилизации может быть доведена, по данным [8], до 0,05... 0,15%. Следует также учитывать, что в условиях стабилизированного потока (при использовании успокоительных устройств) инерционность измерительных приборов не является критичным фактором. Применение демпфирующих устройств и специальных методов обработки результатов измерений позволяет снизить влияние пульсаций уровня до величины, не превышающей 0,05-0,15% от измеряемого значения, что соответствует требованиям метрологических норм для расходомерных установок. Резюмируя, можно оценить максимальную погрешность определения исходного коэффициента расхода величиной порядка 1,0... 1,5%. Для сравнения отметим, что этот показатель для стандартизованных сужающих устройств в напорных водоводах составляет от 0,25 до 1,25%.

На основе обобщения справочной литературы для минимальных и максимальных типоразмеров сужающих устройств можно сделать следующие выводы.

Величина ускорения силы тяжести зависит от широты местности и высотного положения объекта относительно уровня моря. Эти изменения носят регулярный систематический характер и при необходимости могут быть учтены как

корректирующий параметр при обработке результатов измерений.

Поверхность жидкости на границе раздела с воздухом, благодаря силам взаимного притяжения частиц в этом слое, находится в состоянии равномерного натяжения. Благодаря этому на границе раздела формируется равномерное поверхностное натяжение. При истечении через сужающее устройство данная сила создает дополнительное сопротивление движению жидкости, причем ее относительное влияние возрастает при малых размерах сжатого сечения. Оценка влияния поверхностного натяжения может быть выполнена путем сравнения напора над расчетной плоскостью устройства с величиной дефицита напора, возникающего под действием этого фактора [4].

Большинство гидротехнических сооружений и объектов водного хозяйства оснащено объемными типами расходомеров. В подобных системах точность определения расхода может изменяться под воздействием температуры жидкости, уровня аэрации, концентрации взвешенных примесей и степени сжимаемости среды при различных значениях гидростатического давления. Аэрация в свою очередь влияет на плотность и вязкость течения, поэтому ее эффект неоднократно становился предметом специализированных экспериментов [10]. Известные критерии возникновения аэрации: вынос турбулентных возмущений на поверхность, захват воздуха струей, выброс капель и др. – позволяют установить пределы работоспособности расходомерных систем. Однако расчеты по имеющимся зависимостям показывают, что допустимые скорости потока для сужающих устройств значительно ниже критических значений начала аэрации. Поэтому в большинстве практических ситуаций влиянием аэрации на результаты измерений расхода можно пренебречь.

Поскольку расходомеры с сужающими элементами работают в комплексе с уровнемерами или перепададомерами, необходимо учитывать

погрешности, возникающие при контроле уровня воды. К числу таких ошибок относятся: основная погрешность уровня или перепада, определяемая в нормальных условиях, $-\delta_s, \%$; ошибка привязки шкалы измерений к условной нулевой отметке расходомера $-\delta_v, \%$; отклонения, вызванные влиянием неинформативных факторов включая пульсации уровня, $-\delta_{нл}, \%$; дополнительная погрешность регистрации при работе самопишущих устройств $-\delta_{д}, \%$; ошибка, связанная с обработкой диаграмм самопишущих приборов, $-\delta_{об}, \%$; погрешность, обусловленная смещением условной отметки устройства, $-\delta_{дс.у}, \%$.

Отдельно учитывается величина $\delta_{в.с.у}$, возникающая только для устройств свободного истечения с замкнутой геометрией отверстия (прямоугольного, квадратного или трапециевидального профиля). Если после установки наблюдается отклонение оси симметрии от вертикального положения на угол Θ , то, как показано на рисунке 2, это вызывает систематическую ошибку привязки шкалы уровнемера к исходной осевой отметке, что требует внесения соответствующей поправки.

Повышение точности измерений в системах с сужающими устройствами в значительной степени зависит от характеристик применяемых измерительных приборов. Существенным резервом улучшения метрологических свойств является использование уровнемеров и перепададомеров более высокого класса, а также геодезических средств, обеспечивающих корректную привязку шкал к исходным реперным отметкам. Помимо этого, в конструкции расходомера обязательно должны предусматриваться устройства для успокоения потока, позволяющие снизить влияние пульсаций уровня жидкости на результаты измерений.

В случае применения сужающих устройств с незамкнутыми контурами отверстия, например, водосливов, величина корректирующей поправки приобретает переменный характер. Она изменяется в зависимости от фактического уровня

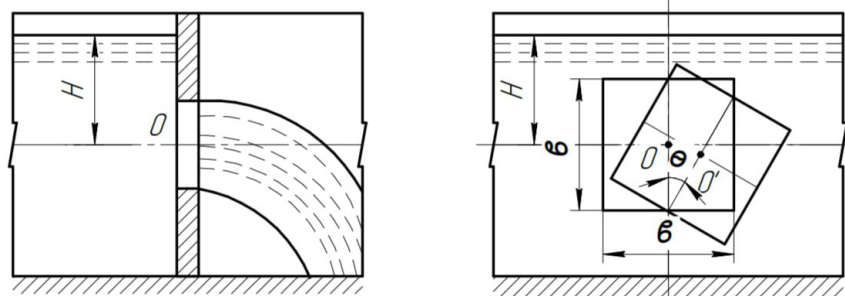


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая формирование ошибки привязки шкалы уровнемера

Fig. 2. Diagram illustrating the formation of an error in the binding of the level gauge scale

воды и отклонений боковых граней от проектных углов. Поэтому, кроме поправок на линейные изменения размеров, требуется учитывать и допуски на угловые смещения.

Систематические ошибки при определении площади проходного сечения могут возникать не только по причине несоблюдения проектных размеров при изготовлении, но и вследствие смещения оси симметрии или неправильного монтажа порога. Эти особенности наглядно показаны на рисунке 3.

В составе исходных коэффициентов расхода для сужающих устройств уже заложен диапазон изменения гидравлического режима (чисел Рейнольдса, Фруда), характерный для условий градуировочных испытаний на эталонных расходомерных установках. Под нормальными условиями испытаний понимаются свободный режим истечения без подтопления, установившееся движение жидкости, отсутствие аэрации, соблюдение геометрических параметров сужающего устройства и подводящего канала согласно нормативной документации.

При прохождении жидкости через сужающее устройство под действием инерционных и гравитационных сил происходит постепенное уменьшение площади живого сечения потока до некоторого минимального значения. Затем струя вновь расширяется и приобретает параметры, определяемые конфигурацией канала в нижнем бьефе. Данное поведение потока

учитывается в уравнении (6) посредством введения коэффициента сжатия струи $\varepsilon = W_2/W_0$.

Поскольку величина ε учтена введением систематической поправки в коэффициент расхода, то исходя из структуры уравнения (6) допущение в дальнейших расчетах $\varepsilon = 1$ влечет за собой прежде всего увеличение погрешности от изменения относительной площади отверстия. При более строгом подходе для исключения дополнительной погрешности, вызванной изменением коэффициента сжатия струи, по сравнению с нормальными условиями испытаний, необходимо также обеспечивать соответствие условий отбора давления и диапазонов изменения уровней воды, чем гарантируется учет изменения сил инерции и гравитации. Кроме того, необходимо учесть влияние сил вязкости введением составляющей погрешности от изменения чисел Рейнольдса. Наконец, как следует из уравнения (6), на характер истечения влияют и условия распределения скоростей, зависящие от изменения сил гидравлического трения в подводящем канале и в пределах сужающего устройства. Рассмотрим более подробно все перечисленные факторы.

Из формулы (6) следует, что коэффициенты расхода сужающих устройств зависят от изменения сил гидравлического трения. С точки зрения особенностей воздействия этих сил участок канала, прилегающий к расходомеру, можно условно разделить на три характерные зоны. В пределах самого сужающего устройства силы

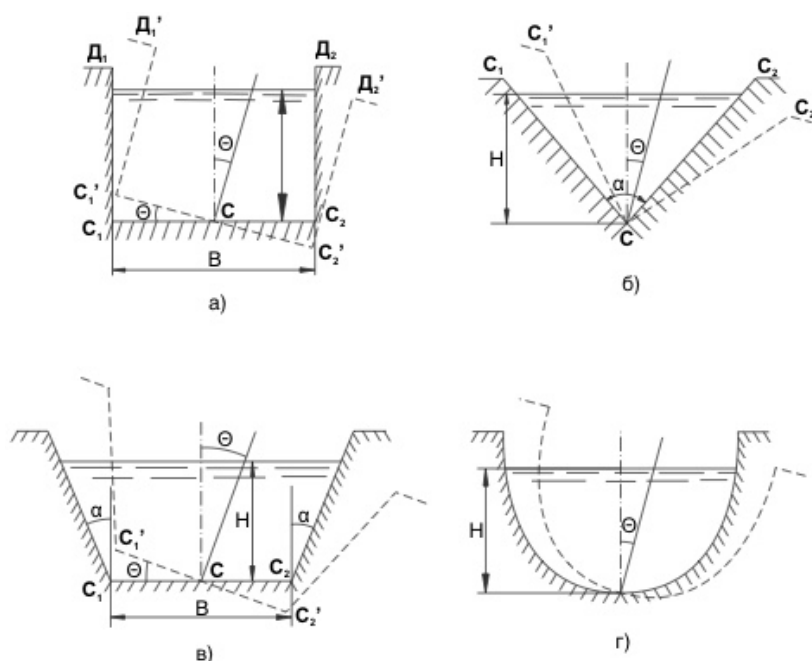


Рис. 3. Расчетные схемы к определению составляющей погрешности измерений площади сужающих устройств по причине смещения их вертикальной оси при монтаже

Fig. 3. Calculation schemes for determining the component error of measurements of the area of constricting devices due to the displacement of their vertical axis during installation

гидравлического трения оказывают прямое воздействие на коэффициент расхода, что непосредственно следует из структуры градуировочной характеристики.

На протяжении подводящего участка канала между сечениями I-I и 0-0 силы гидравлического трения оказывают косвенное влияние на величину коэффициента расхода, зависящее от величины относительной площади отверстия (модуля сжатия). Вследствие изменения сил гидравлического трения меняется и режим потока на подводящем участке. В результате это приводит к отклонениям формы кривой спада свободной поверхности, а следовательно, к изменению величины коэффициента сжатия струи по сравнению с нормальными условиями испытаний. Поэтому протяженность второй зоны ограничивается расстоянием от сужающего устройства до точки отбора давления (отверстия успокоительного колодца для размещения уровнемера), превышающим длину распространения кривой спада. Наконец, геометрия канала и режим потока в зоне, расположенной до точки отбора давления, представляют интерес, поскольку они формируют начальные условия энергетического баланса, принятые при выводе градуировочной характеристики расходомера. Изменение этих факторов влияет на величину τ_1 в формуле (6), а следовательно, и на коэффициент расхода.

При строгом подходе искомая погрешность должна учитывать взаимную корреляцию действующих факторов в этих зонах, однако предварительные расчеты показывают незначительность величин корреляционных моментов, поэтому дополнительным приращением погрешности

заведомо можно пренебречь, компенсируя данное допущение коэффициентами запаса.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Дополнительным источником погрешности рабочих расходомеров являются нарушения граничных условий применения сужающих устройств, в частности, режимы подтопления и превышение допустимой подходной скорости потока, приводящие к изменению коэффициента сжатия струи.

2. Использование сужающих устройств в режиме подтопленного истечения является метрологически нежелательным вследствие необходимости учета дополнительных составляющих погрешности: неравномерности распределения скоростей в нижнем бьефе, неустойчивости потока в зоне сопряжения бьефов, деформации поля скоростей в сжатом сечении и изменения конфигурации свободной поверхности перед расходомером.

3. Применение эмпирических поправочных коэффициентов для учета влияния подтопления на градуировочные характеристики расходомеров является неоправданным ввиду сложности воспроизведения многофакторных условий сопряжения бьефов (траектории струи, формы гидравлического прыжка, режима отводящего канала и др.).

4. Расходомеры с сужающими устройствами не обеспечивают нормативную точность измерений при нарушении граничных условий подтопления.

Список использованных источников

1. Догановский А.М. Гидрология суши (Общий курс): Учебник. СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2012. 523 с. EDN: XEMKOV
2. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): Учебник. Изд. 5-е, репр. М.: Бастет, 2008. EDN: QMFVHR
3. Брянская Ю.В., Зуйков А.Л., Доронин Ф.Л., Юмашева М.А. Гидравлика гидротехнических сооружений: Учебно-методическое пособие. [Электронный ресурс]. М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2020. 57 с. [mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/...](https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/)
4. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: Учебник. М.: Колос С, 2004. 655 с. EDN: QMEDIL
5. Хлебнова В.И. Методы и средства измерения расхода жидкости и газа: перспективы применения ультразвуковых преобразователей с широким измерительным лучом // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 9 (678). С. 45-52. EDN: WJUJKT
6. Шансон Х. Гидравлика потока в открытом канале: Введение. 2-е изд. Оксфорд: Баттерворт-Хайнеманн, 2004. 630 с.

References

1. Doganovsky A.M. Hydrology of Land (General Course): A textbook for students in higher education institutions studying in the fields of "Hydrometeorology" and "Applied Hydrometeorology". St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2012. 523 p. EDN: XEMKOV
2. Chugaev R.R. Hydraulics: (Technical Fluid Mechanics): Textbook for Students of Hydraulic Engineering Specialties in Higher Education Institutions / R.R. Chugaev; R.R. Chugaev. – 5th Edition, Reprint. – Moscow: Bastet, 2008. EDN: QMFVHR
3. Bryanskaya Yu.V. et al. Hydraulics of Hydraulic Structures [Electronic resource] / Yu.V. Bryanskaya, A.L. Zuykov, F.L. Doronin, M.A. Yumasheva. Moscow: MISI – MGSU Publishing House, 2020. 57 p. [mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/...](https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/)
4. Shterenlicht D.V. Hydraulics: a textbook for university students studying in the areas of training, diploma of specialists in the field of engineering and technology, villages, and fish farms – 3rd ed., revised. and add. Moscow: KolosS Publ., 2004. 655 p. (Textbook). EDN: QMEDIL

7. Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д. О применимости уравнения Д. Бернулли в исследованиях гидродинамических процессов в сужающих устройствах гидроавтоматики // Гидравлика. 2025. № 26. С. 43-64. EDN: HGXZXT

8. Наумова А.А., Пилипенко Т.В., Пономарчук К.Р. Классификация и обзор конструктивных схем расходомеров с сужающими устройствами для открытых водотоков // Природообустройство. 2024. № 5. С. 88-95. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-88-95. EDN: SDEVHC

9. Государственная система обеспечения единства измерений расхода жидкости в безнапорных каналах систем водоснабжения и канализации. Методика выполнения измерений при помощи стандартных водосливов и лотков: Рекомендация. МИ 2406-97, ВНИИМС. 15.05.1997 г.

10. Даев Ж.А. Измерительные системы расхода и количества жидкости и газа переменного перепада давления: обзор и анализ достижений за последние десятилетия // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 2 (20). С. 19-24.

5. Khlebnova V.I. Methods and Means of Measuring Fluid and Gas Flow: Prospects for the Use of Ultrasonic Transducers with a Wide Measuring Beam / V.I. Khlebnova // Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. 2016. No. 9(678). P. 45-52. EDN: WJUJK

6. Chanson H. The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction / H. Chanson. – 2nd ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004. 630 p.

7. Pilgunov V.N. On the Applicability of D. Bernoulli's Equation in Studies of Hydrodynamic Processes in Hydraulic Automation Constrictive Devices / V.N. Pilgunov, K.D. Efremova // Hydraulics. 2025. No. 26. P. 43-64. EDN: HGXZXT

8. Naumova A.A. Classification and review of design schemes for flow meters with constrictions for open watercourses / A.A. Naumova, T.V. Pilipenko, K.R. Ponomarchuk // Prirodoobustroystvo. 2024. No. 5. P. 88-95. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-88-95. EDN: SDEVHC

9. Recommendation of the state system for ensuring the uniformity of measurements of liquid flow in gravity channels of water supply and sewerage systems; methodology for performing measurements using standard spillways and trays MI 2406-97, VNIIMS15.05.97

10. Daev Zh.A. Measuring systems of flow rate and quantity of liquid and gas of variable pressure drop: review and analysis of achievements for the last decades. Monitoring. Management. Control. 2017. № 2 (20). P. 19-24.

Сведения об авторах

Анна Анатольевна Наумова, соискатель кафедры «Гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами» SPIN-код: 9108-7416; AuthorID: 1010469; orcid: 0000-0002-0373-8655; koshevaya81@mail.ru

Алексей Васильевич Перминов, канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами»; orcid: 0000-0003-2848-1793; alexperminov@rgau-msha.ru

Кахлеррас Джиллали, канд. техн. наук, Национальная высшая школа гидравлики (НВШГ) Алжир; orcid: 0000-0002-4431-2159; d.kahlerras@ensh.dz

Information about the authors

Anna A. Naumova, applicant for the department of hydraulics, hydrology and water resources management SPIN-code: 9108-7416; AuthorID: 1010469; orcid: 0000-0002-0373-8655; koshevaya81@mail.ru

Aleksey V. Perminov, CSs (Tech), associate professor of the department of hydraulics, hydrology and water resources management; orcid: 0000-0003-2848-1793; alexperminov@rgau-msha.ru

Kahlerras Jillili, CSs (Tech), National Higher School of hydraulics (NGSG), Algeria; orcid: 0000-0002-4431-2159; d.kahlerras@ensh.dz

Вклад авторов

А.А. Наумова: постановка задачи, разработка методики исследования, анализ влияния граничных условий на точность измерений, формулирование выводов и рекомендаций.

А.В. Перминов: статистическая обработка результатов, подготовка графических материалов.

К. Джиллали: систематизация и анализ литературных источников, подготовка текста статьи и оформление иллюстративного материала.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received office 19.11.2025

Поступила после рецензирования / Received 07.12.2025

Принята к публикации / Accepted publication 17.12.2025

Contribution of the authors

A.A. Naumova: formulation of the problem, development of research methods, analysis of the influence of boundary conditions on the accuracy of measurements, formulation of conclusions and recommendations.

A.V. Perminov: statistical processing of results, preparation of graphic materials.

K. Jillaly: systematization and analysis of literary sources, preparation of the text of the article and design of illustrative material.