

9. Manual on the applicability of oil spill dispersants / European Maritime Safety Agency. Version 2012. – Текст электронный. – URL: <http://www.emsa.europa.eu/opr-documents/opr-manual-a-guidelines/item/719-manual-on-the-applicability-of-oil-spill-dispersants.html>. (дата обращения 12.02.2021).
10. Silva I.A., Almeida F.C.G., Souza T.C., Bezerra K.G.O., Durval I.J.B., Converti A., Sarubbo L.A. Oil spills: impacts and perspectives of treatment technologies with focus on the use of green surfactants // *Environmental Monitoring and Assessment* – 2022. – V.194. – Номер статьи 143. – DOI: 10.1007/s10661-022-09813-z.
11. Techtmann S.M., Domingo J.S., Conmy R., Barron M. Impacts of dispersants on microbial communities and ecological systems // *Applied Microbiology Biotechnology*. – 2023. – V. 107. – PP. 1095-1106. – DOI: 10.1007/s00253-022-12332-z.
12. Use of dispersants to treat oil spills: technical information, paper 4 // ИТОПФ. – 2011. – 11 p. Текст электронный. – URL: https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/TIPS_TAPS_new/TIP_4_Use_of_Dispersant_s_to_Treat_Oil_Spills.pdf. (дата обращения 10.10.2024).
13. Wise J., Wise J.P. A review of the toxicity of chemical dispersants // *Reviews on Environmental Health*. – 2023. – V. 26 (4). – DOI:10.1515/reveh.2011.035.

УДК 556.5.07

DOI:10.7242/echo.2024.4.2

ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЗОНЫ ПЕРЕМЕННОГО ПОДПОРА КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

А.П. Лепихин¹, А.В. Богомолов^{1,2}, М.А. Опутин¹¹Горный институт УрО РАН, г. Пермь²ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь

Аннотация: В работе отражены результаты инструментальных измерений на р. Кама (Камское водохранилище) с помощью многопараметрического датчика Valeport Midas ECM. Проведен сравнительный анализ результатов вычисления скоростей течения различными методами: 0-мерный, 1-мерный и инструментальный. Показана неравномерность распределения уклонов водной поверхности в зоне выклинивания подпора Камского водохранилища. Представлены расчеты для различных сценариев в программном продукте HEC-RAS, в том числе, при которых наблюдается вертикальная стратификация водных масс Камского водохранилища в районе г. Березники. Показана невозможность принятия гипотезы о линейном распределении уклона водной поверхности на участке Камского водохранилища (пгт Тюлькино – г. Березники).

Ключевые слова: водохранилище, подпор, уклон водной поверхности, скорости течения, неоднородность водных масс, вертикальная стратификация, моделирование гидрологических процессов.

Введение

Гидравлический режим зоны выклинивания Камского водохранилища играет ключевую роль в обеспечении забора технической воды промышленных предприятий Соликамско-Березниковского промузла. Характерной особенностью рассматриваемой зоны является неравномерное распределение уклонов водной поверхности.

В то же время при анализе гидрологических характеристик, как правило, исходят из гипотезы линейного распределения уклонов водной поверхности. В данном случае, поскольку рассматриваемый объект находится в зоне переменного подпора, уклоны водной поверхности значительно отличаются на разных участках от пгт Тюлькино до г. Березники. Как было показано в [1], в разные фазы гидрологического режима водохранилища распределение уклонов меняется в зависимости от наполненности водохранилища, притока и режима сработки водохранилища. В период наполнения водохранилища до отметки, близкой к НПУ, наблюдается равномерность распределения уклона водной поверхности на исследуемом участке, тогда как при снижении притока и уменьшении

уровня воды имеет место значительное расхождение в значениях уклона в пгт Тюлькино и в г. Березники.

Понимание характера формирования неравномерного распределения уклона напрямую связано с вертикальной стратификацией водных масс, которая наблюдается в районе промышленных предприятий г. Березники. В трудах [2-3] подробно описаны критерии формирования вертикальных стратификаций. Поскольку оголовки водозаборов промышленных предприятий располагаются в придонном слое, в частности, водозабор АО «БСЗ», проблема скопления высокоминерализованных рассолов в данных слоях вследствие вертикальной стратификации является актуальной. Как показано в [4-5], механизм формирования вертикальной стратифицированной водной массы обусловлен гидрологическими особенностями рассматриваемого участка Камского водохранилища, а именно расположением участка в зоне переменного подпора, для которого характерны существенные изменения высотных отметок и уклонов водной поверхности. Также важным фактором, определяющим особенности гидрохимического режима, является его расположение в зоне активного техногенеза с длинной историей освоения недр, наличие существенных фильтрационных разгрузок, обусловленных комплексом естественных и техногенных факторов [6]. Гидрологические особенности зоны выклинивания подпора на Камском водохранилище рассматривались в работе [7], только с феноменологических позиций.

Материалы и методы

Значения уклонов водной поверхности, полученные на основе данных наблюдений на гидрологических постах р. Кама – пгт Тюлькино и Камское водохранилище – г. Березники, к сожалению, не отражают реальную картину распределения уклонов на всем участке от пгт Тюлькино до г. Березники. В связи с тем, что данный участок водохранилища находится в зоне переменного подпора, на нем наблюдается сложный характер распределения гидравлических уклонов по длине рассматриваемого участка и аналогичное изменение скоростей течения. С целью получения более корректной оценки распределения уклонов водной поверхности была построена одномерная модель в программном продукте (ПО) HES-RAS [8]. В работе выполнен анализ расхождений между скоростями течения, полученными в ходе полевых инструментальных измерений и результатов расчетов в ПО HES-RAS, а также величин, полученных посредством 0-мерного приближения – формулы Шези:

$$V = C\sqrt{R * I}, \quad (1)$$

где V – средняя скорость течения, C – коэффициент Шези, R – гидравлический радиус, I – уклон водной поверхности.

В свою очередь, коэффициент Шези C определяется как:

$$C = \frac{1}{n} * R^{1/6}, \quad (2)$$

где n – коэффициент шероховатости.

Учитывая постоянство значений n и R для рассматриваемой акватории, определяющую роль в вычислении скоростей течения играет уклон водной поверхности.

В ходе данной работы были проведены натурные измерения на трёх вертикалях: 1 – в районе пгт Тюлькино, 2 – в районе г. Соликамска и 3 – у водозабора АО «БСЗ» г. Березники. Измерения проводились с помощью многопараметрического датчика Valeport Midas ECM.

*Методика измерения скоростей потока
с помощью многопараметрического датчика Valeport Midas ECM*

Прибор представляет собой точечный измеритель течений, разработанный для высокоточных измерений. Архитектура блока электроники прибора позволяет подключать несколько датчиков и чипов связи с прибором, создавая возможность использовать изего в реальном времени через кабель или в качестве автономного измерителя.

Во время настройки прибора осуществляется его синхронизация с персональным компьютером по времени и выполняется сброс датчика давления. В это время прибор должен находиться вне воды, на воздухе. Также при настройке задается частота, с которой необходимо производить измерения определяемых параметров.

Измерение скорости потока выполняется электромагнитным датчиком. В основе его работы лежит эффект Фарадея, заключающейся в индуцировании электрического поля в движущемся потоке проводящей жидкости, находящейся в магнитном поле. Величина электродвижущей силы пропорциональна скорости движения жидкости. Измерения проводятся в горизонтальной плоскости, а их результаты даются в ортогональной оси координат X, Y в виде измеренных значений компонентов скорости потока – V_x , V_y . Результирующие значения вектора скорости потока представляются в виде модуля $V_R = (V_x^2 + V_y^2)^{1/2}$ и его магнитного азимута.

Результаты измерений представляются в табличном виде и включают в себя, кроме указанных выше скоростных параметров потока также следующие характеристики: дату и время измерений, мутность (FTU), давление (DBAR), температуру воды (°C).

Прибор позволяет измерять скорости течения в диапазоне от 0 до 5 м/с с разрешением до 0,001 м/с. Точность измерений составляет 1% измеряемого значения. Точность определения направления течения составляет менее 1°.

Также в рамках выполнения полевых работ были установлены логгеры записи уровней воды, электропроводности и температуры воды в створе пгт Тюлькино, г. Соликамска и г. Березники. Данные, полученные с логгеров, будут иметь большую дискретность по сравнению с данными гидрологических постов. Запись уровней и других характеристик на приборах ведётся каждые 20 минут. В перспективе данные, полученные с логгеров, дадут представление о внутрисуточных колебаниях уровней воды, а соответственно, и уклонов водной поверхности.

Обсуждение результатов

Во время проведения полевых работ на каждой вертикали производилось измерение с шагом ~ 1 м, всего было получено 1200-1500 единиц измерений для каждой вертикали. Скорости течения уменьшаются по мере увеличения глубины. На графиках (рисунки 1-3) представлены кривые средних скоростей для каждого горизонта измерений, а также кривые отклонений от их среднего значения: $V_{cp} + 2\sigma$, $V_{cp} - 2\sigma$, где V_{cp} – среднее значение скорости течения на горизонте, σ – стандартное отклонение. Соответственно, все значения скоростей течения лежат в пределах $\pm 2\sigma$ с вероятностью 95%. Как следует из рис. 1-3, в рассматриваемом потоке наблюдаются значительные пульсационные эффекты, при этом на каждой из горизонталей заметен большой «размах» значений скоростей течения.

Поскольку на рассматриваемом участке р. Кама (Камского водохранилища) изменение уклонов по ширине водного объекта является незначительным, а также время расчетов моделей, создаваемых в HEC-RAS, является минимальным, то применение гидродинамических моделей в 1-мерной постановке лучшим образом подходит для решения рассматриваемых в работе задач.

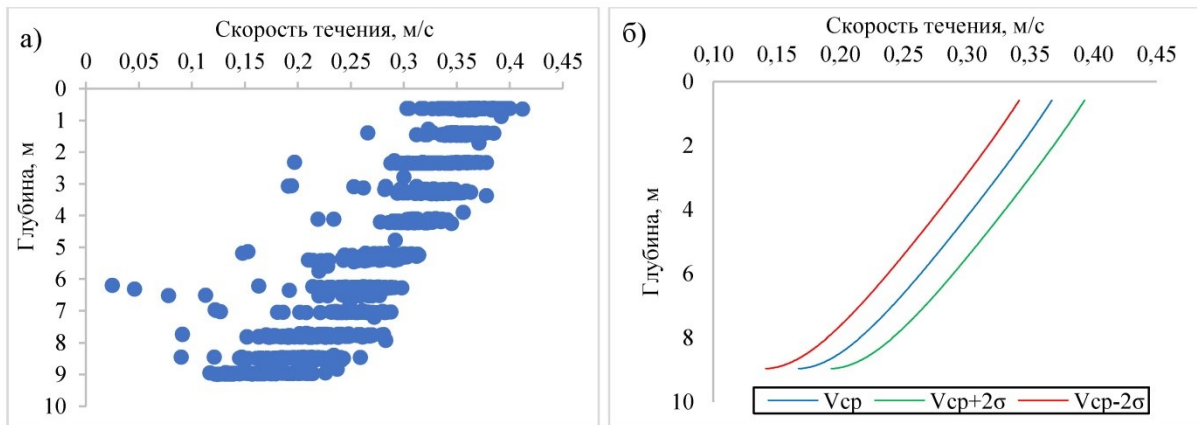


Рис. 1. Распределение скоростей течения по глубине потока (а), зависимость средних значений скорости течения в пределах $\pm 2\sigma$ от глубины потока (б) (пгт Тюлькино)

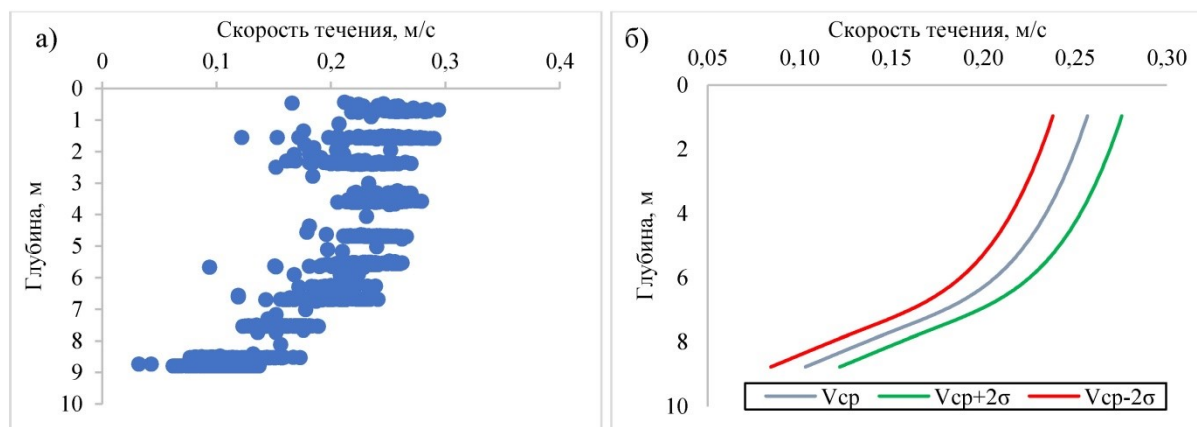


Рис. 2. Распределение скоростей течения по глубине потока (а), зависимость средних значений скорости течения в пределах $\pm 2\sigma$ от глубины потока (б) (г. Соликамск)

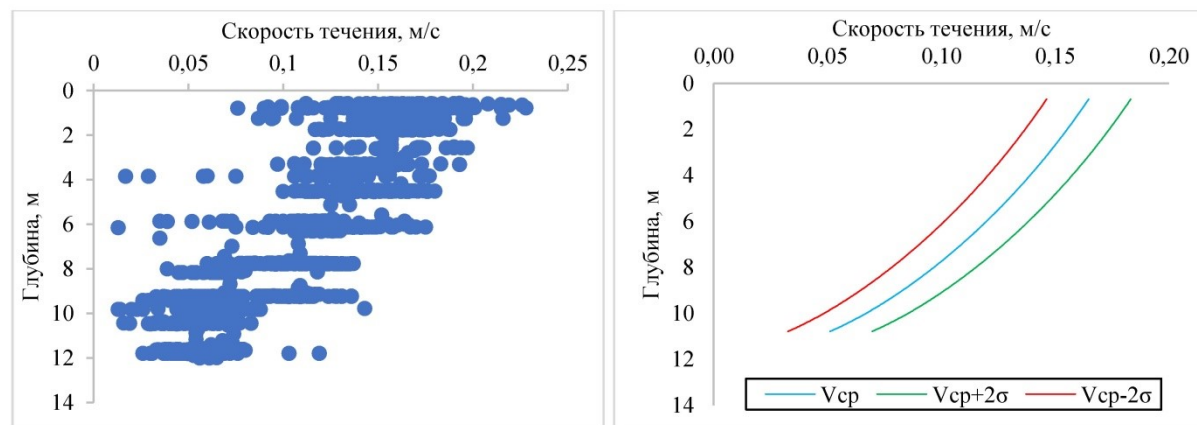


Рис. 3. Распределение скоростей течения по глубине потока (а), зависимость средних значений скорости течения в пределах $\pm 2\sigma$ от глубины потока (б) (г. Берзеники)

Расчеты были выполнены для следующих сценарных условий, наблюдаемых на изучаемом участке (рис. 4).

1. Стабильный поддерживаемый уровень НПУ (108.5 м БС) при постоянных значениях расхода притока.

2. Наблюдается суточное снижение притока воды на $50 \text{ м}^3/\text{сек}$ при уровне воды на КамГЭС $\sim 105.35 \text{ м БС}$. Данный сценарий отражает гидрологические условия, при которых наблюдались резкие колебания содержания хлоридов в забираемой воде в октябре и ноябре 2023 г.
3. Стабильный уровень воды на отметке 105.35 м БС и постоянном притоке. Так как зимний период характеризуется низкими уровнями воды и устойчивыми зимними расходами воды, данный сценарий относится к холодному периоду.
4. Снижение притока на $100 \text{ м}^3/\text{с}$ при относительно резких колебаниях уровней воды на 0.15 м/сут относительно НПУ (108.5 м БС). Данный сценарий охватывает летний период 2023 г., когда при эпизодическом снижении уклонов воды наблюдалось резкое повышение содержания хлоридов в придонном слое рассматриваемого участка.

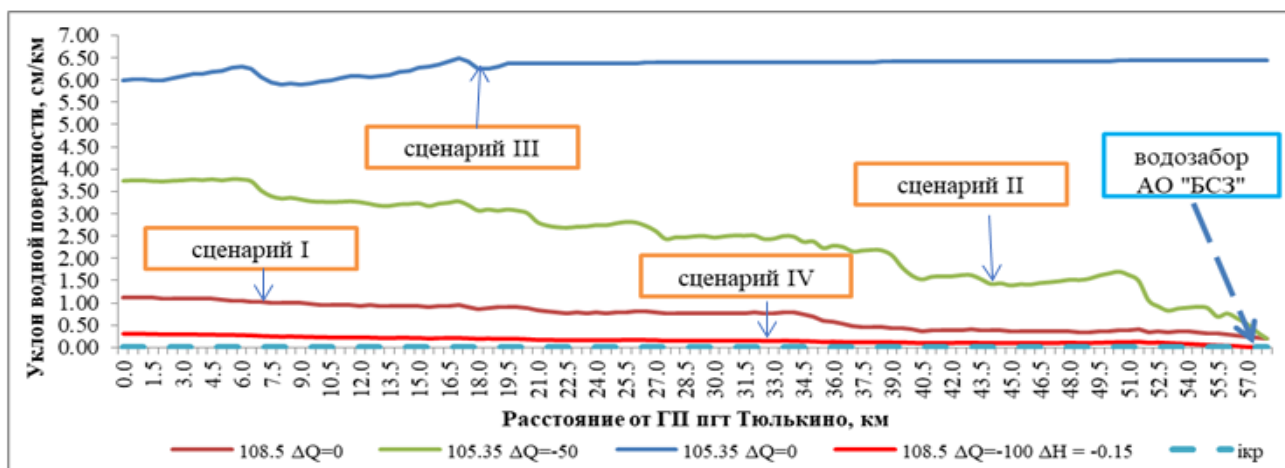


Рис. 4. График изменения уклона водной поверхности на участке от пгт Тюлькино до г. Березники при реализации различных сценариев гидрологического режима

Критически низкие уклоны водной поверхности, при которых формируется вертикальная стратификация водных масс, определяются сочетанием двух факторов: уровнем воды, поддерживаемым на КамГЭС, и его межсуточными колебаниями. При одновременном снижении притока по р. Каме и снижении уровня воды КамГЭС наблюдаются минимальные уклоны.

В данной работе проводится сравнительный анализ характерных значений скоростей течения, рассчитанных тремя различными методами (табл. 1):

I метод – инструментальный с помощью многопараметрического датчика Valeport Midas ECM;

II метод – 0-мерный способ на основе использования формулы Шези (2) при коэффициенте шероховатости $n = 0.020$;

III метод – 1-мерная модель, выполненная в ПО HES-RAS при $n = 0.020$.

Как видно из табл. 1, наиболее близким по вычисленным значениям скоростей течения к инструментальным измерениям методом является 1-мерное моделирование. Значительное отличие полученных значений скорости течения V в пгт. Тюлькино с помощью формулы Шези от инструментальных является следствием того, что в формуле не учитывается грядовое сопротивление, характерное для данного створа. В работе [9] подробно описаны гидроморфометрические зависимости для створа пгт Тюлькино. Для вертикали в г. Березниках также обнаружилось значительное различие в значениях V , полученных натурными измерениями и с помощью формулы Шези. Данный факт объясняется неравномерностью распределения уклона

водной поверхности. При вычислении скорости течения с помощью формулы Шези принимался для расчета уклон между г. Соликамском и г. Березники, тогда как расстояние между ними составляет ~ 40 км. Учитывая описанный выше феномен неравномерности распределения уклонов на участке пгт Тюлькино – г. Березники, точность определения скоростей течения посредством формулы Шези для данного створа достаточно низкая.

Таблица 1

Характерные значения скоростей течения для трёх исследуемых вертикалей на основе использования инструментального метода (I), соотношения Шези (II) и HES-RAS (III)

V, м/с						R, м	I, м/м	C, м ^{1/2} /с	H, м БС (04.09.2024)
I метод			II метод	III метод					
	V _{ср}	V _{пов}			V _{прид}				
пгт Тюлькино	0.28	0.37	0.17	0.48	0.29	8.97	5·10 ⁻⁶	72.07	108.08
г. Соликамск	0.20	0.26	0.10	0.21	0.20	8.80	1·10 ⁻⁶	71.84	107.82
г. Березники	0.11	0.16	0.06	0.26	0.13	11.72	1·10 ⁻⁶	75.36	107.76

Примечание: V_{ср} – среднее значение скорости течения; V_{пов} – скорость течения в поверхностном горизонте; V_{прид} – скорость течения в придонном слое.

Заключение

В рамках данной работы были показаны результаты инструментальных измерений, проведенных с помощью Valeport Midas ESM на р. Кама (Камском водохранилище). Был дан сравнительный анализ трех методов измерения и вычисления скоростей течения. Результаты, полученные путем 1-мерного моделирования, являются наиболее близкими к инструментальным измерениям. Проведенные исследования показали, что оценка гидравлических уклонов как разницы отметок уровней воды на двух смежных гидрометрических постах в зоне выклинивания подпора Камского водохранилища является некорректной. В рамках данного исследования с целью получения более корректных оценок распределения уклонов на участке р. Камы (Камского водохранилища) пгт Тюлькино – г. Березники проведено численное моделирование на основе использования HES-RAS. В период заполнения Камского водохранилища до отметки близкой к НПУ констатируется существенная равномерность распределения уклонов, в то время как при снижении притока и уменьшении уровня воды наблюдается значительное расхождение в значениях уклонов в пгт Тюлькино и г. Березники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лепихин А.П., Опутин М.А. Особенности гидрологического режима зоны выклинивания подпора Камского водохранилища и его влияние на устойчивость технического водоснабжения предприятий г. Березники // Горное эхо. – 2024. – № 1 (94). – С. 7-12. – DOI: 10.7242/echo.2024.1.2.
2. Cheng Z., Constantinescu G. Stratification effects on flow hydrodynamics and mixing at a confluence with a highly discordant bed and a relatively low velocity ratio // Water Resources Research. – 2018. – V. 54, №. 7. – С. 4537-4562. – DOI: 10.1029/2017WR022292.
3. Cheng Z., Constantinescu G. Stratification effects on hydrodynamics and mixing at a river confluence with discordant bed // Environmental Fluid Mechanics. – 2020. – V. 20, №. 4. – P. 843-872. – DOI: 10.1007/s10652-019-09725-6.

4. Лепихин А.П., Веницианов Е.В., Любимова Т.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомоллов А.В. Влияние вертикальной неоднородности водных масс на устойчивость промышленного водоснабжения в зонах высокой техногенной нагрузки // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2021. – № 4. – С. 53-63. – DOI: 10.17076/Lim1419.
5. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомоллов А.В., Ляхин Ю.С., Исахов А. Особенности гидродинамики водоемов с вертикальной плотностной неоднородностью водных масс в условиях активного техногенеза // Вычислительная механика сплошных сред. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 115-124. – DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.1.9.
6. Лепихин А.П., Возняк А.А., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомоллов А.В. Исследование особенностей формирования и масштабов диффузного загрязнения, сформированного крупными промышленными комплексами, на примере Соликамского-Березниковского промузла // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 5. – С. 560-566. – DOI: 10.31857/S0321059620050120.
7. Шайдулина А.А., Двинских С.А. Режим скоростей течения в районе переменного подпора Камского водохранилища // Географический вестник. – 2017. – № 3 (42). – С. 61-70. – DOI: 10.17072/2079-7877-2017-3-61-70.
8. HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Version 6.2 (CPD-69) / Gary W. Brunner. – December, 2022. – 464 p.
9. Лепихин А.П. К проблеме построения гидроморфометрических зависимостей для аллювиальных русел // Географический вестник. – 2015. – № 3(34). – С. 115-125.

УДК 556.5.08

DOI:10.7242/echo.2024.4.3

К АНАЛИЗУ СТАТИСТИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВОДЫ В ВОДОТОКАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РАЗБАВЛЕНИЯ (ХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД)

А.П. Лепихин¹, Т.Н. Синцова¹, А.В. Богомоллов^{1,2}

¹Горный институт УрО РАН, г. Пермь

²ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь

Аннотация: В настоящее время при решении практических задач появляется необходимость оценки расходов воды в водотоке, имеющем сложную геометрическую форму поперечного сечения русла. Поэтому предложено для решения этих задач использовать метод разбавления, так как он не требует задания скорости течения и площади поперечного сечения, как в традиционных методах измерения. Однако при его широком практическом использовании наблюдается значительная нестабильность измерений расходов воды. Поэтому впервые в данной работе теоретически обоснованы механизмы, определяющие погрешности измерений расходов воды химическим методом. Показано, что высокая неустойчивость результатов измерения расходов воды в водотоках обусловлена самой структурой используемых расчетных зависимостей, при этом колебания расходов воды описываются обратным нормальным распределением, для которого оценки средних значений и дисперсий несостоятельны. Впервые в результате математического моделирования погрешностей измерений расходов воды по схеме Монте-Карло выявлено, что при низкой изменчивости концентрации маркера $Cv_C < 0,1$ их оценки состоятельны, а при $Cv_C > 0,25$ – неустойчивы. Предложен эффективный способ для повышения устойчивости измерений расходов воды – уменьшение колебаний измеряемых концентраций в контрольном створе.

Ключевые слова: расход воды, химический метод измерения расхода, коэффициент вариации, погрешности измерений.

Введение

При решении практических задач достаточно часто возникает необходимость оценки расходов воды в водотоках, поперечное сечение русел которых имеет сложную геометрическую форму. Использование традиционных методов измерений [1, 2], построенных на оценке средней скорости течения и площади поперечного сечения, вызывает значительные сложности. Для решения этих задач рекомендуется использовать метод разбавления, который не требует задания скорости течения и площади