ГИДРАВЛИКА. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 532.5

Г.В. Волгин, Д.В. Куликов*
НИУ МГСУ,
**ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КООРДИНАТНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВОДНЫХ ПОТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАД-056 В КАНАЛЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Проведен анализ требований к экспериментальным данным при расчете турбулентных характеристик водных потоков. Показана необходимость проверки базы данных реализаций пульсаций на непрерывность по времени и необходимую репрезентативность по количеству точек в реализации. Приведены результаты экспериментов, показывающие важность фиксации длины реализации и время проведения испытаний. Предложена методика определения оптимальной пространственной координаты для проведения измерений с целью минимизации времени наполнения базы экспериментальных данных.

Ключевые слова: турбулентность, турбулентные потоки, открытый поток, лазерно-доплеровский метод, измерение турбулентности, пульсации скорости, касательные напряжения, точность измерения, анемометрия

Одним из современных методов экспериментальных исследований турбулентности водных потоков является метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Измерительный комплекс ЛАД-056[1] (Россия), реализующий бесконтактные измерения полного вектора скорости гидродинамических потоков методами лазерной доплеровской анемометрии, состоит из двух двухкомпонентных комплиментарных ЛДА ЛАД-05 и ЛАД-06. Лазерные доплеровские измерители скорости установлены на координатно-перемещающемся столе, обеспечивающем перемещение в диапазоне от 0 до 250 мм по трем координатам. Объединенный «ЛАД-056» позволяет получить реализации пульсаций скорости всех трех компонент (продольной u'_x, вертикальной u'_y и поперечной u'_z, соответственно) [1—3] с частотой измерения до 3000 раз в секунду, что выгодно отличает такой измерительный комплекс от всех предыдущих аналогов. Компоненты u'_x, u'_z — система измеряет, u'_y высчитывает на основе формулы, связанной с углом сведения лучей «ЛАД-056».

Точность измерения скорости водного потока зависит от точности измерения доплеровской частоты. Исследования показали, что среднеквадратичная ошибка измерений в диапазоне скоростей 1...10 м/с при времени осреднения 0,1 с составляет всего лишь 0,01...0,001 % [4], что позволяет считать такие измерения высокоточными.

[1] Установлен в лаборатории кафедры гидравлики и использования водных ресурсов НИУ МГСУ.

© Волгин Г.В., Куликов Д.В., 2015

Второй частью стенда является лабораторный гидравлический лоток «G.U.N.T.» Gerätebau GmbH (Германия). Гидравлический лоток представляет из себя канал прямоугольного сечения со стеклянными боковыми стенками и стальным дном. Коэффициент шероховатости стенок и дна — 0,009, длина канала — 12,5 м, ширина — 0,311 м. В рамках экспериментов по измерению пульсаций скорости водного потока уклон дна был постоянным и составлял 1,5 %. Были созданы условия для сохранения в потоке равномерного движения.

Выполнен анализ экспериментальных данных с целью разработки оптимальной методики измерения турбулентного водного потока (рис. 1).

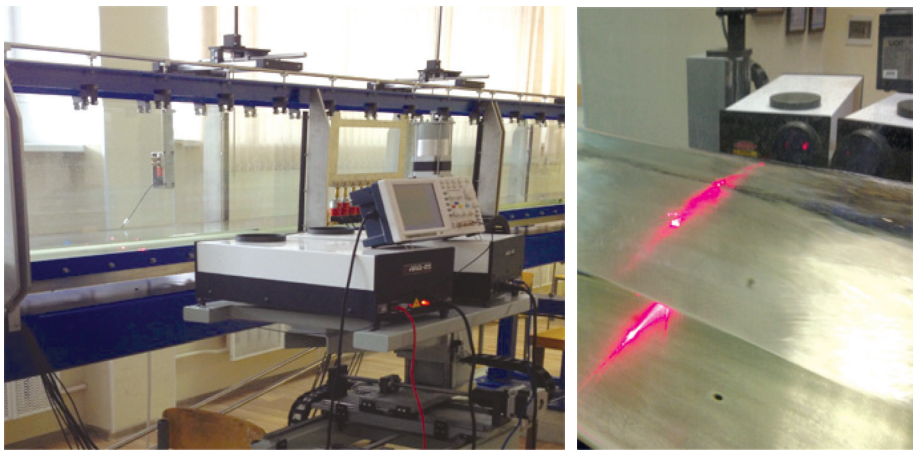


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Первый тест на достоверность экспериментальных данных о турбулентности (после определения достаточной точности измерений) — это тест на «случайность». Другими словами необходимо определить подчиняются ли опытные данные известным законам нормального распределения (или распределения по Гауссу) [1, 5—10]. Исследование закона распределения вероятностей сводится к исследованию поведения его определяющих характеристик — центральных моментов. Первый центральный момент для любой случайной величины равен нулю по определению. Второй центральный момент, качественно определяющий степень рассеяния случайной величины, является важной характеристикой случайного процесса и в данном случае определяет стандарт пульсаций скорости или интенсивность турбулентности, который в свою очередь является основой для расчета. Отклонения от нормального распределения следует учесть в коэффициентах асимметрии и эксцесса, третьего и четвертого центральных моментов [6, 10—12].

Также к экспериментальным данным добавляются требования об оптимальной длине реализации и непрерывности сигнала [11, 13]. На основе математической обработки экспериментальных данных (реализаций пульсаций скорости) можно получить информацию о пространственно-энергетических характеристиках турбулентного потока [11, 14—16] (табл. 1 [6, 11]).

Табл. 1. Характеристики турбулентности и требования к длине реализации и непрерывности сигнала

Номер	Статистические показатели	Расчетная формула	Физический (статистический) смысл показателя	Специальные требования	
				к длине реализации	к непрерывности сигнала
1	Плотность распределения вероятности пульсаций	$F(U') = \int_{-\infty}^{-\infty} P(U')dU'$, где $P(U')$ — плотность пульсаций скорости	Тест на случайность	Нет	Нет
2	Распределение по интенсивности турбулентности по глубине	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} U_i'^2}{N}}$, где U_i' — пульсация скорости	Мера «силы» турбулентности	Да [13]	Нет
3	Распределение коэффициента асимметрии по глубине потока	$\mu_3 = \frac{1}{\sigma^3 N} \sum_{i=0}^{N-1} U_i'^3$,	Показывает наличие восходящих и нисходящих движений в потоке	Нет	Нет
4	Распределение эксцесса по глубине потока	$\mu_4 = \frac{1}{\sigma^4 N} \sum_{i=0}^{N-1} U_i'^4 - 3$	Мера остроты пика распределения вероятностей	Нет	Нет
5	Распределение турбулентных касательных напряжений по глубине потока	$\tau_\Sigma = \mu \frac{dU_x}{dz} + \rho \overline{U_x' U_z'}$	Определяет характеристики сил вязкости в потоке	Да [13]	Нет
6	Корреляционная функция	$R(k\Delta\tau) = \frac{1}{N - kl - 1} \sum_{i=0}^{N-kl-1} U_i U_{i+kl}$	Масштаб турбулентности (масштабы вихревых образований)	Да [17]	Да
7	Спектральная функция	$S_1(m\Delta\omega) = \frac{2\Delta\tau}{\pi} \sum_{k=0}^{k} R(k\Delta\tau)\cos(k\Delta\tau m\Delta\omega)$	Энергетические характеристики потока (вихревых образований)	Да [10]	Да

Величины, определяемые в строках 1, 3, 4, традиционно относятся к методам описательной математической статистики, при расчете которых не создается никаких специальных требований к длине (величины базы данных) реализации и непрерывности сигнала. В этом случае достаточная длина реализации связана с количеством наблюдений, для того чтобы выборка была репрезентативной [18]. Размер выборки также определяется минимизацией ресурсов при максимизации репрезентативности. Величины, определяемые в строках 2, 5—7 табл. 1, накладывают дополнительное требование к экспериментальным данным, таким как частота измерения.

При вычислении характерных масштабов турбулентности (см. табл. 1 строка 6) время измерения определяет максимальный масштаб турбулентности, который возможно получить на основе экспериментальных данных.

При измерении пульсации скорости длина реализации состоит из необходимого количества экспериментальных точек. Экспериментальные точки при использовании ЛАД-056 — это количество вспышек излучения доплеровского сигнала. Оператор может в программе управления системой задавать необходимое количество точек (вспышек).

Для определения времени получения необходимой длины реализации был сделан первый эксперимент. В канале прямоугольного сечения на расстоянии 4600 мм от входа в канал производились измерения пульсаций скорости водного потока. Глубина потока в месте измерения составляла 32,7 мм. План перемещений состоял из 21 точки измерения с шагом 5 мм. С учетом показателя преломления света в воде 1,33 шаг составил 6,65 мм, что соответствует расстоянию 140 мм по нормали от боковой стенки канала. Измерения проводились на глубине 15 мм. Необходимым условием было получение длины реализации в 2000 точек (вспышек) значений компоненты скорости U_x в каждой точке измерения (т.е. условием перехода системы измерения к следующей точке было получение 2000 достоверных значений скорости). Время нахождения в каждой точке измерительного комплекса (другими словами время измерения) приведено в табл. 2.

Табл. 2. Время измерения пульсаций скорости в зависимости от расстояния

Расстояние от первой стеклянной стенки, мм	Время измерения в данной точке, с
6,65	436
13,30	356
19,95	406
26,60	470
33,25	516
39,90	565
46,55	603
53,20	133
59,85	729
66,50	772
73,15	877
79,80	966
86,45	389

Окончание табл. 2.

Расстояние от первой стеклянной стенки, мм	Время измерения в данной точке, с
93,10	1250
99,75	1415
106,40	905
113,05	1767
119,70	1683
126,35	2317
133,00	1729
139,65	3455

Таким образом, как видно из табл. 2, время проведения измерений растет с заглублением измерительного объема и увеличением расстояния от боковой стенки, и на расстоянии в 139 мм время измерения выросло практически на порядок.

Увеличение времени связано с поглощающими свойствами среды и с преломлением лазерных пучков на поверхности раздела сред (воздух — стекло, стекло — вода). По мере заглубления измерительного объема в канал растет величина смещения лазерных пучков, что приводит к ухудшению сигнала. Причина ухудшения связана со взаимодействием лазерных пучков с плоской поверхностью прозрачной стенки и характерна для всех оптических измерителей на основе методов измерения ЛДА. Для уменьшения данного эффекта используются дополнительные иллюминаторы специальной формы, которые позволяют вводить лазерные пучки по нормали к поверхности [19].

На рис. 2 показан случай расположения ЛДА под углом θ к нормали границы раздела фаз воздух — стекло — вода. Стрелкой показано направление при перемещении ЛДА на расстояние *r* от начальной точки. При заглублении в поток возникает разность хода между лучами *AB* и *CB*. Такой случай нередко возникает в натурных экспериментах с ограниченным местом для размещения прибора.

Так как размер измерительного объема в направлении *Y* обычно варьируется для разных приборов от 1 до 2,5 мм, то при расхождении лучей *AB* и *CB* на дистанцию около 1 мм либо прибор перестанет работать совсем, либо коэффициент преобразования доплеровской скорости в частоту будет нелинейным, что внесет погрешность в измерения [20]. Для угла θ = 8° расхождение на миллиметр достигается уже при заглублении в воду на 150 мм.

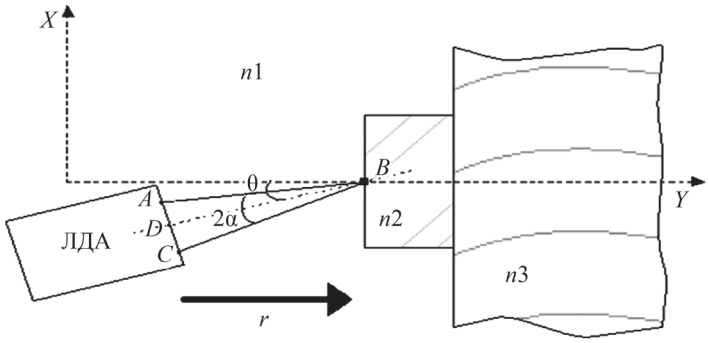


Рис. 2. Прохождение лучей через границы раздела фаз воздух — стекло — вода под произвольным углом θ между нормалью и оптической осью [19]

Для определения координатной области канала, в которой возможно получение оперативных измерений без использования дополнительных оптических элементов, разработана методика. Согласно методике был проведен второй эксперимент по измерению пульсаций скорости водного потока горизонтального профиля в канале. Было изменено правило перехода системы сбора данных в последующую точку, а именно, условием стало время сбора данных в каждой точке. В каждой точке плана эксперимента набиралась статистика длительностью 30 с. Область канала, в которой происходит сбор 500 и более достоверных значений пульсаций скорости (достоверных вспышек) за отведенное время, считается подходящим для измерения турбулентных процессов водного потока.

График результата третьего эксперимента (рис. 3), показывает зависимость получения количества достоверных вспышек от расстояния от первой стеклянной границы. Время сбора данных в каждой точке плана эксперимента составляло 600 с.

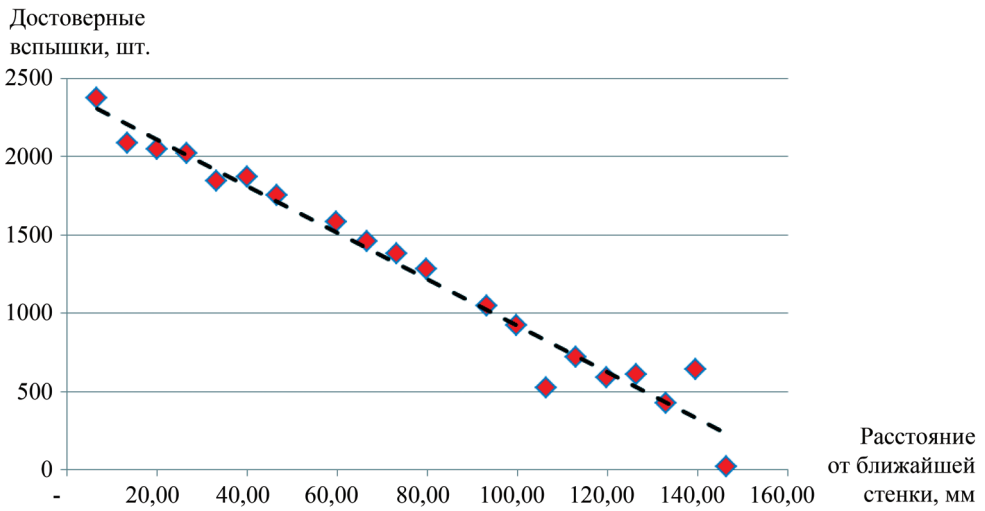


Рис. 3. Количество достоверных вспышек в зависимости от расстояния от стенки

График (см. рис. 3) показывает, что при удалении от стеклянной стенки количество достоверных вспышек неуклонно падает. Таким образом, важно определить в какой области необходимо проводить экспериментальные исследования, так как это связано с экономией вычислительных ресурсов, а также с максимизацией репрезентативности данных физического эксперимента.

Падение количества мгновенных измерений в зависимости от расстояния от первой стеклянной границы связано с расстоянием, которое проходит сигнал по газовой среде, потом через стекло, а потом через толщу воды (рис. 4).

Следовательно, для получения более состоятельных по количеству экспериментальных данных следует выбирать пространственную координату как можно ближе к стенке, но с соблюдением условий отсутствия влияния твердой стенки на процессы турбулентного обмена.

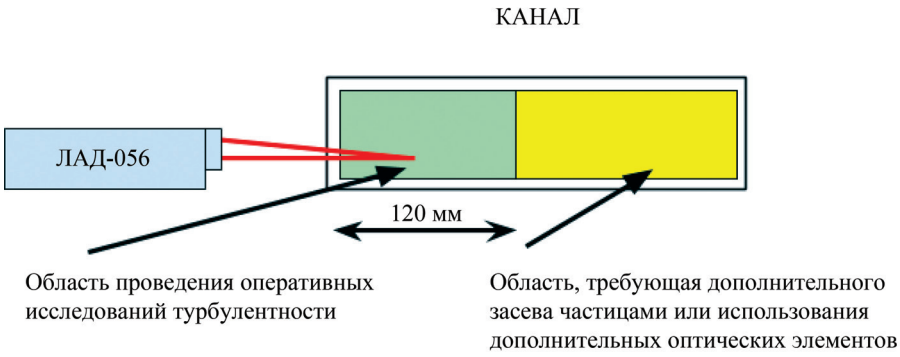


Рис. 4. Оптимальная координатная область для исследования турбулентных водных потоков с использованием ЛАД-056 в канале прямоугольного сечения

Планирование эксперимента по измерению параметров турбулентности водного потока, перечисленных в табл. 1, необходимо проводить при одновременном соблюдении двух условий: максимизации достоверности экспериментальных данных и минимизации используемых ресурсов. Временной ресурс — время проведения исследований — оказывает существенное влияние на стоимость всего эксперимента в целом.

Согласно методике определения оптимальной координатной области при измерении турбулентных водных потоков с использованием ЛАД-056 в канале прямоугольного сечения со стеклянными стенками установлено, что оперативные измерения необходимо проводить в диапазоне от 0 до 120 мм от ближней боковой стенки. При большем заглублении необходимо использовать иллюминаторы, уменьшающие преломления лазерных пучков.

Библиографический список

1. *Альтшуль А.Д., Киселев П.Г.* Гидравлика и аэродинамика : основы механики жидкости. М. : Стройиздат, 1965. 274 с.

2. *Смольяков А.В., Ткаченко В.М.* Измерение турбулентных пульсаций. Л. : Энергия, 1980. 264 с.

3. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. 7-е изд., испр. М. : Дрофа, 2003. 840 с. (Классики отечественной науки)

4. Turbomachines: Aeroelasticity, Aeroacoustics and Unsteady Aerodynamics. Ed. by V.A. Skibin, V.E. Saren, N.M. Savin, S.M. Frolov. Moscow : TORUS PRESS Ltd., 2006. Pp. 446—457.

5. *Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П., Сабелев Г.И., Таранов Г.С.* Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М. : Атомиздат, 1978. 296 с.

6. *Тепакс Лео*. Равномерное турбулентное движение в трубах и каналах. Таллин : Валгус, 1975. 255 с.

7. *Марсден Дж. Е., Чорин А*. Математические основы механики жидкости / пер. с англ. В.Е. Зализняка ; под ред. А.В. Борисова. М. ; Ижевск : Регуляр. и хаоти. динамика, 2004. 203 с.

8. *Лятхер В.М*. Турбулентность в гидросооружениях. М. : Энергия, 1968. 408 с.

9. *Breugem W.P., Boersma B.J. and Uittenbogaard R.E.* The influence of wall permeability on turbulent channel flow // J. Fluid Mech. 2006. Vol. 562. Pp. 35—72.

10. *Лойцянский Л.Г.* О некоторых приложениях метода подобия в теории турбулентности // Прикладная математика и механика. 1935. Т. 2. № 2. С. 180—206.

11. *Боровков В.С.* Русловые процессы и динамика ручных потоков на урбанизированных территориях. Л. : Гидрометеоиздат, 1989. 286 с.

12. *Великанов М.А.* Русловой процесс: основы теории. М. : Физматлит, 1958. 395 с.

13. *Волгин Г.В.* Влияние длины реализации пульсаций скорости на точность расчета турбулентных касательных напряжений // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 93—99.

14. *Брянская Ю.В., Маркова И.М., Остякова А.В.* Гидравлика водных и взвесенесущих потоков в жестких и деформируемых границах / под ред. В.С. Боровкова. М. : МГСУ ; Изд-во АСВ, 2009. 263 с.

15. *Тарасов В.К., Волгина Л.В., Гусак Л.Н.* Пространственные составляющие турбулентной вязкости // Вестник МГСУ. 2008. № 1. С. 221—224.

16. *Волгина Л.В., Тарасов В.К., Волгин Г.В.* Определение коэффициента полезного действия взвесенесущего потока // Ледовые и термические процессы на водных объектах России : сб. науч. тр. VI Всеросс. конф. (г. Рыбинск, 24—29 июня 2013 г.). М. : Изд-во КЮГ, 2013. С. 251—256.

17. *Волгина Л.В.* Влияние вида корреляционной функции на методы определения макроструктур турбулентного потока // II Междунар. (VII традиционная) науч.-техн. конф. мол. уч., аспир. и докт. М. : МГСУ, 2004. С. 204—211.

18. *Клавен А.Б., Копалиани З.Д.* Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб. : Нестор-история, 2011. 543 с.

19. *Рахманов В.В.* Анализ применимости оптической иммерсии для диагностики течений методом ЛДА в моделях топок сложной геометрии // Теплофизические основы энергетических технологий : сб. науч. тр. IV Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Томск, 10—12 октября 2013 г.). Томск : ТПУ, 2013. С. 155—160.

20. *Рахманов В.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Наумов И.В., Садбаков О.Ю.* Особенности ЛДА-измерений в натурных гидродинамических экспериментах // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности : сб. тр. Десятой Междунар. науч.-практ. конф. (27—29.04.2011, г. Санкт-Петербург, Россия) / под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. Т. 3: Высокие технологии, и фундаментальные исследования. С. 196—198.

Поступила в редакцию в октябре 2015 г.

Об авторах: **Волгин Георгий Валентинович** — аспирант кафедры гидравлики и водных ресурсов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, volgin-gv@mail.ru, hydraulics@mgsu.ru;

Куликов Дмитрий Викторович — младший научный сотрудник, **ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН**, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, д. 1, kulikov.dmitriy@gmail.com.

Для цитирования: *Волгин Г.В., Куликов Д.В.* Методика определения оптимальной координатной области при измерении турбулентности водных потоков с помощью ЛАД-056 в канале прямоугольного сечения // Вестник МГСУ. 2016. № 2. С. 106—115.

G.V. Volgin, D.V. Kulikov

METHOD OF DETERMINING THE OPTIMAL COORDINATE DOMAIN IN THE MEASUREMENT OF WATER FLOWS TURBULENCE USING LAD-56 IN RECTANGULAR CHANNELS

One of the modern methods of the experimental investigation of water flows turbulence is the method of Laser Doppler Anemometry. At the present time a measuring system “LAD-056” (Russia) is operating in the laboratory of the Department of Hydraulics of MGSU.

The authors conducted an analysis of the requirements to experimental data when calculating turbulent characteristics of water flows. The article shows the necessity of checking the database of ripple continuity over time and the required representation of the number of points in the implementation. The results of experiments are presented showing the importance of fixing the length of the implementation and testing time. The authors offered a method of determining the optimal spatial coordinates for the measurement to minimize the time of filling the base of experimental data.

According to the methods of defining optimal coordinate domain when measuring turbulent water flows with the use of “LAD-056” in a rectangular channel with glass walls in was established that it is required to conduct measurements within the range from 0 to 120 mm from the closest side wall. In case of greater deepening it is required to use illuminators reducing deflections of laser beams.

Key words: turbulence, turbulent flows, open flow, Laser Doppler method, turbulence measurement, velocity fluctuation, shear stresses, measurement accuracy, anemometry

References

1. Al’tshul’ A.D., Kiselev P.G. *Gidravlika i aerodinamika : osnovy mekhaniki zhidkosti* [Hydraulics and Aerodynamics : Bases of Fluid Mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1965, 274 p. (In Russian)

2. Smol’yakov A.V., Tkachenko V.M. *Izmerenie turbulentnykh pul’satsiy* [Measurement of Turbulent Fluctuations]. Leningrad, Energiya Publ., 1980, 264 p. (In Russian)

3. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and Gas Mechanics]. 7th edition, revised. Moscow, Drofa Publ., 2003, 840 p. (Klassiki otechestvennoy nauki) [Classics of Russian Science] (In Russian)

4. Skibin V.A., Saren V.E., Savin N.M., Frolov S.M. Turbomachines: Aeroelasticity, Aeroacoustics and Unsteady Aerodynamics. Moscow, TORUS PRESS Ltd., 2006, pp. 446—457.

5. Ibragimov M.Kh., Subbotin V.I., Bobkov V.P., Sabelev G.I., Taranov G.S. *Struktura turbulentnogo potoka i mekhanizm teploobmena v kanalakh* [Structure and Mechanism of Turbulent Flow in Heat Exchange Channel]. Moscow, Atomizdat Publ., 1978, 296 p. (In Russian)

6. Tepaks Leo. *Ravnomernoe turbulentnoe dvizhenie v trubakh i kanalakh* [A Uniform Turbulent Flow in Pipes and Channels]. Tallin, Valgus Publ., 1975, 255 p. (In Russian)

7. Chorin A.J., Marsden J.E. A Mathematical Introduction to Fluid Mechanics. 2000, Springer; 3rd edition, 172 p.

8. Lyakhter V.M. *Turbulentnost’ v gidrosooruzheniyakh* [Turbulence inside Hydraulic Structures]. Moscow, Energiya Publ., 1968, 408 p. (In Russian)

9. Breugem W.P., Boersma B.J. and Uittenbogaard R.E. The Influence of Wall Permeability on Turbulent Channel Flow. J. Fluid Mech. 2006, vol. 562, pp. 35—72. DOI: http://dx.doi.org/10.1017/S0022112006000887.

10. Loytsyanskiy L.G. O nekotorykh prilozheniyakh metoda podobiya v teorii turbulentnosti [On Some Applications of Similarity Method in Turbulence Theory]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied Mathematics and Mechanics]. 1935, vol. 2, no. 2, pp. 180—206. (In Russian)

11. Borovkov V.S. *Ruslovye protsessy i dinamika rechnykh potokov na urbanizirovannykh territoriyakh* [Channel Processes and Dynamics of River Flows in Urbanized Territories]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, 286 p. (In Russian)

12. Velikanov M.A. *Ruslovoy protsess: (osnovy teorii)* [Channel Process (Theoretical Framework)]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1958, 395 p. (In Russian)

13. Volgin G.V. Vliyanie dliny realizatsii pul'satsiy skorosti na tochnost' rascheta turbulentnykh kasatel'nykh napryazheniy [Effect of Velocity Fluctuations Length on the Calculation Accuracy of Turbulent Shearing Stresses]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 9, pp. 93—99. (In Russian)

14. Bryanskaya Yu.V., Markova I.M., Ostyakova A.V. *Gidravlika vodnykh i vzvesenesushchikh potokov v zhestkikh i deformiruemykh granitsakh* [Hydraulics of Water Flows and Suspended Matter Bearing Flows in Rigid and Deformable Borders]. Moscow, ASV Publ., 2009, 263 p. (In Russian)

15. Tarasov V.K., Volgina L.V., Gusak L.N. Prostranstvennye sostavlyayushchie turbulentnoy vyazkosti [Spatial Components of Turbulent Viscosity]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2008, no. 1, pp. 221—224. (In Russian)

16. Volgina L.V., Tarasov V.K., Volgin G.V. Opredelenie koeffitsienta poleznogo deystviya vzvesenesushchego potoka [Defining Performance Coefficient of a Suspensions-Carrying Flow]. *Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob"ektakh Rossii : sbornik nauchnykh trudov VI Vserossiyskoy konferentsii (g. Rybinsk, 24—29 iyunya 2013 g.)* [Ice and Termal Processes on Water Objects of Russia : Collection of Scientific Works of the 6th All-Russian Conference (Rybinsk, June 24—29, 2013)]. Moscow, KYuG Publ., 2013, pp. 251—256. (In Russian)

17. Volgina L.V. Vliyanie vida korrelyatsionnoy funktsii na metody opredeleniya makrostruktur turbulentnogo potoka [Influence of Correlation Function Type on the Methods of Identifying Macrostructures of Turbulent Flow]. *2 Mezhdunarodnaya (7 traditsionnaya) NTK molodykh uchenykh, aspirantov i doktorantov* [2nd International (7th Traditional) Scientific and Technical Conference of Young Researchers, Postgraduates and Doctoral Students]. Moscow, MGSU Publ., 2004, pp. 204—211. (In Russian)

18. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. *Eksperimental'nye issledovaniya i gidravlicheskoe modelirovanie rechnykh potokov i ruslovogo protsessa* [Experimental Investigations and Hydraulic Modeling of River Flows and Channel Process]. Saint Petersburg, Nestor-istoriya Publ., 2011, 543 p. (In Russian)

19. Rakhmanov V.V. Analiz primenimosti opticheskoy immersii dlya diagnostiki techeniy metodom LDA v modelyakh topok slozhnoy geometrii [Analysis of the Applicability of Optical Immersion Technique for Flows Diagnosis Using LDA Method in the Models of Fireboxes of Complex Geometry]. *Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologiy : sbornik nauchnykh trudov IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Tomsk, 10—12 oktyabrya 2013 g.)* [Proceedings of the 4th All-Russian Science and Practice Conference "Thermophysical Bases of Energy Technologies"]. Tomsk, TPU Publ., 2013, pp. 155—160. (In Russian)

20. Rakhmanov V.V., Anikin Yu.A., Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Naumov I.V., Sadbakov O.Yu. Osobennosti LDA-izmereniy v naturnykh gidrodinamicheskikh eksperimentakh [Features of LDA-measurements in the Field of Hydraulic Engineering Experiments]. *Issledovanie, razrabotka i primenenie vysokikh tekhnologiy v promyshlennosti : sbornik trudov Desyatoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (27—29.04.2011, g. Sankt-Peterburg, Rossiya)* [Research, Development and Application of High Technologies in Production : Collection of Works of the 10th International Science and Practice Conference (27—29.04.2011, Saint-Petersburg, Russia)]. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta Publ., 2011, vol. 3: Vysokie tekhnologii, i fundamental'nye issledovaniya [High Technologies and Fundamental Research]. Pp. 196—198. (In Russian)

About the authors: **Volgin Georgiy Valentinovich** — postgraduate student, Department of Hydraulics and Water Resources, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; volgin-gv@mail.ru, hydraulics@mgsu.ru;

Kulikov Dmitriy Viktorovich — junior research worker, **Institute of Thermophysics named after S.S. Kutateladze SB RAS**, 1 prospekt Akademika Lavrent'eva, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; kulikov.dmitriy@gmail.com.

For citation: Volgin G.V., Kulikov D.V. Metodika opredeleniya optimal'noy koordinatnoy oblasti pri izmerenii turbulentnosti vodnykh potokov s pomoshch'yu LAD-056 v kanale pryamougol'nogo secheniya [Method of Determining the Optimal Coordinate Domain in the Measurement of Water Flows Turbulence Using LAD-56 in Rectangular Channels]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 2, pp. 106—115. (In Russian)