

УДК 631.6. (575.2)

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/01>

## МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОКАЛЬНО ИЗОТРОПНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ

- ©Пресняков К. А., д-р техн. наук, SPIN-код: 9808-6544, Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан  
©Керимкулова Г. К., SPIN-код: 9488-6326, канд. физ.-мат. наук, Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан, [gulsaat@mail.ru](mailto:gulsaat@mail.ru)  
©Першакова Е. Ю., Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан, [hellper64@mail.ru](mailto:hellper64@mail.ru)

## METHOD TO DETECT LOCALLY ISOTROPIC ELEMENTS IN A WATER TURBULENT FLOW

- ©Presnyakov K., Dr. habil., SPIN-code: 9808-6544, Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan  
©Kerimkulova G., SPIN-code: 9488-6326, Ph.D., Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Kyrgyzstan, Bishkek, [gulsaat@mail.ru](mailto:gulsaat@mail.ru)  
©Pershakova E., Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, [hellper64@mail.ru](mailto:hellper64@mail.ru)

*Аннотация.* В данной статье рассмотрена возможность повышения надежности способа выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды путем введения, вместо традиционных структурных функций, их пульсационных модификаций. Обоснованно введены относительные пульсационные структурные функции и на их основе выявлен предсказуемо ожидаемый результат — отсутствие в основной части реального турбулентного потока воды элементов локально изотропного течения. Предположена вероятность существования в ламинарном пограничном слое элементов локальной изотропии, критерием которой служит отношение вертикальной и продольной пульсационных структурных функций, равная  $1,3 \pm 0,4$ .

*Abstract.* This article discusses the possibility of improving the reliability of a method for detecting elements of a locally isotropic flow in a turbulent flow of water by introducing, instead of the traditional structural functions, their pulsation modifications. Relative pulsation structural functions were justified, and, on their basis, a predictable expected result was revealed — the absence of elements of a locally isotropic flow in the main part of a real turbulent water flow. The probability of the existence of elements of local isotropy in the laminar boundary layer is suggested, the criterion of which is the ratio of vertical and longitudinal pulsation structure functions equal to  $1.3 \pm 0.4$ .

*Ключевые слова:* пульсация, структурная функция, относительная толщина, ламинарный пограничный слой.

*Keywords:* pulsation, structural function, relative thickness, laminar boundary layer.

### Постановка задачи исследований

В гидродинамике (в рамках физических моделей изотропной и локально изотропной турбулентности) известен способ выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды [1, с. 249–254, с. 261–269]. Способ заключается в измерении распределений продольной и поперечной (вертикальной) компонент скорости воды по глубине потока, в вычислении отношений поперечной и продольной структурных функций  $\frac{D_{nn}}{D_{ll}}$ , где  $D_{ll} = \overline{[u(y_1) - u(y_2)]^2}$  [1, с. 265, ф. (113)] — продольная структурная функция;  $D_{nn} = \overline{[v(y_1) - v(y_2)]^2}$  [1, с. 265, ф. (113)] — поперечная структурная функция;  $u(y_1), u(y_2)$  — значения продольной компоненты скорости воды в измерительных точках с координатами  $y_1, y_2$  соответственно;  $v(y_1), v(y_2)$  — значения поперечной компоненты скорости воды в измерительных точках с координатами  $y_1, y_2$  соответственно. Далее, строят график зависимости  $\frac{D_{nn}}{D_{ll}} = F(y)$ , на этом графике находят точку (или точки), где выполняется условие локальной изотропии течения воды ( $\frac{D_{nn}}{D_{ll}} = 1,33$  [1, с. 267, ф. (117)]).

Недостатки известного способа определяются следующими моментами: если при пользовании продольными структурными функциями в нашем распоряжении имеется достаточное количество полуэмпирических профилей продольной компоненты скорости, то при обращении к поперечным структурным функциям, подобного аналитического профиля вертикальной компоненты скорости не существует. Перечисленное затрудняет аналитическую оценку отношения  $\frac{D_{nn}}{D_{ll}}$  и, тем самым, снижает надежность известного способа.

*Задача исследований* — повышение надежности предлагаемого способа путем введения, вместо традиционных структурных функций, их пульсационных модификаций.

### Решение поставленной задачи

Поставленная задача решается методом выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды. Суть метода заключается в том, что:

–измеряют распределения продольной и поперечной (вертикальной) компонент скорости воды по глубине потока, вычисляют отношение поперечной и продольной структурных функций  $\frac{D_{nn}}{D_{ll}}$ , где  $D_{ll} = \overline{[u(y_1) - u(y_2)]^2}$  — продольная структурная функция;  $D_{nn} = \overline{[v(y_1) - v(y_2)]^2}$  — поперечная структурная функция;  $u(y_1), u(y_2)$  — значения продольной компоненты скорости воды в измерительных точках с координатами  $y_1, y_2$  соответственно;  $v(y_1), v(y_2)$  — значения поперечной компоненты скорости воды в измерительных точках с координатами  $y_1, y_2$  соответственно;

–строят график зависимости  $\frac{D_{nn}}{D_{ll}} = F(y)$ , на этом графике находят точку (или точки), где

выполняется условие локальной изотропии течения воды ( $\frac{D_{nn}}{D_{ll}} = 1,33$ ).

В рассматриваемом методе измеряют распределения пульсаций продольной и вертикальной компонент скорости воды по глубине потока вблизи границы турбулентного и ламинарного пограничного слоев ( $\tilde{y}=10^{-6} \dots 10^{-4}$ ). Подбирают пары измерительных точек таким образом, что вертикальные координаты соседних точек в каждой паре отличаются друг от друга на величину порядка длины пути смещения и обеспечивают, тем самым, независимость измерений кинематических характеристик в соседних точках каждой пары; вычисляют отношение относительных пульсационных вертикальной и продольной структурных функций  $\frac{\tilde{D}_{v'v'}}{\tilde{D}_{u'u'}}$ , где  $\tilde{D}_{u'u'} = \frac{|\overline{\tilde{u}'(\tilde{y}_2) - \tilde{u}'(\tilde{y}_1)}|^2}{\tilde{u}'(\tilde{y}_2) \tilde{u}'(\tilde{y}_1)}$  — относительная пульсационная продольная структурная функция;  $\tilde{D}_{v'v'} = \frac{|\overline{\tilde{v}'(\tilde{y}_2) - \tilde{v}'(\tilde{y}_1)}|^2}{\tilde{v}'(\tilde{y}_2) \tilde{v}'(\tilde{y}_1)}$  — относительная пульсационная вертикальная структурная функция;  $\tilde{u}'(\tilde{y}_2), \tilde{u}'(\tilde{y}_1)$  — значения пульсаций продольной компоненты скорости воды в промежутке времени  $\Delta t$  с вертикальными координатами  $\tilde{y}_2, \tilde{y}_1$  соответственно;  $\tilde{v}'(\tilde{y}_2), \tilde{v}'(\tilde{y}_1)$  — значения пульсаций вертикальной компоненты скорости воды в промежутке времени  $\Delta t$  с вертикальными координатами  $\tilde{y}_2, \tilde{y}_1$  соответственно;

— строят график зависимости  $\frac{\tilde{D}_{v'v'}}{\tilde{D}_{u'u'}} = \psi\left(\frac{\tilde{y}_2 + \tilde{y}_1}{2}\right)$ , где  $\tilde{y}_2, \tilde{y}_1$  — координаты для каждой пары подобранных измерительных точек и из этого графика определяют точку (или точки), где выполняется условие локальной изотропии течения воды ( $\frac{\tilde{D}_{v'v'}}{\tilde{D}_{u'u'}} = 1,3 \pm 0,4$ ).

Подобное решение задачи исследования обеспечивает повышение его надежности за счет более глубокого физического обоснования отдельных положений исходных физических моделей изотропной турбулентности.

Обоснование предлагаемого метода выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды производят следующим образом.

Запишем выражения полных производных по времени от компонент скорости в плоскопараллельном установившемся потоке воды [2]. При этом учтем следующие обстоятельства:

1. прямолинейный поток,  $w=0$  (отсутствует поперечная циркуляция потока воды);
2.  $u = \text{const}(x), v = \text{const}(x)$  — изотропная турбулентность.

Тогда

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (1)$$

Положим, для изотропной турбулентности  $\frac{du}{dt} = 0$  и  $\frac{dv}{dt} = 0$ . Тогда

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Введем замены: первые слагаемые уравнений (2)

$\partial u = u'_{\Delta t}$  — пульсация (флуктуация) продольной компоненты скорости по времени на промежутке  $\Delta t$ ,  $\partial v = v'_{\Delta t}$  — пульсация (флуктуация) вертикальной компоненты скорости по времени на промежутке  $\Delta t$ ;

вторые слагаемые  $\delta u = u'_{\Delta y}$  — флуктуация (пульсация) продольной компоненты скорости по координате на промежутке  $\Delta y$ ,  $\delta v = v'_{\Delta y}$  — флуктуация (пульсация) вертикальной компоненты скорости по координате на промежутке  $\Delta y$ .

Кроме того  $\delta t = \Delta t$ ,  $\delta y = \Delta y$ . Уравнения (2) примут вид:

$$u'_{\Delta y} = -\frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} \cdot u'_{\Delta t}, \quad v'_{\Delta y} = -\frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} \cdot v'_{\Delta t}.$$

Введем пульсационные структурные функции:

$$D_{u'u'} = \overline{u'_{\Delta y}(y_1) - u'_{\Delta y}(y_2)}^2, \quad D_{v'v'} = \overline{v'_{\Delta y}(y_1) - v'_{\Delta y}(y_2)}^2$$

Преобразуем выражение для пульсационной продольной структурной функции

$$D_{u'u'} = \overline{\left[ -\frac{1}{v_1} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} \cdot u'_{\Delta t}(y_1) + \frac{1}{v_2} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} \cdot u'_{\Delta t}(y_2) \right]^2} = \left( \frac{\Delta y}{\Delta t} \right)^2 \cdot \overline{\left[ \frac{1}{v_2} \cdot u'_{\Delta t}(y_2) - \frac{1}{v_1} \cdot u'_{\Delta t}(y_1) \right]^2}$$

Принимая

во внимание, что измерения пульсации скорости производят в двух достаточно близких измерительных точках, положим  $v_1 \approx v_2 \approx v$ . Тогда

$$D_{u'u'} = \frac{1}{v^2} \left( \frac{\Delta y}{\Delta t} \right)^2 \cdot \overline{u'_{\Delta t}(y_2) - u'_{\Delta t}(y_1)}^2.$$

Опустив индексы  $\Delta t$  у пульсаций, подразумевая тем самым, что в последующем выражении фигурируют пульсации продольной компоненты скорости по времени, имеем

$$D_{u'u'} = \frac{1}{v^2} \left( \frac{\Delta y}{\Delta t} \right)^2 \cdot \overline{u'(y_2) - u'(y_1)}^2,$$

и аналогично

$$D_{v'v'} = \frac{1}{v^2} \left( \frac{\Delta y}{\Delta t} \right)^2 \cdot \overline{v'(y_2) - v'(y_1)}^2.$$

Запишем выражения для искомых функций в безразмерном виде. Очевидно, что

$$\frac{D_{u'u'}}{u_*^2 \left( \frac{\Delta y}{\Delta t} \right)^2} = \tilde{D}_{u'u'} = \overline{\tilde{u}'(\tilde{y}_2) - \tilde{u}'(\tilde{y}_1)}^2, \quad \frac{D_{v'v'}}{u_*^2 \left( \frac{\Delta y}{\Delta t} \right)^2} = \tilde{D}_{v'v'} = \overline{\tilde{v}'(\tilde{y}_2) - \tilde{v}'(\tilde{y}_1)}^2.$$

Выявляем выполнимость условия локальной изотропии турбулентности течения воды для точки (или точек), т. е. достижения численного значения отношения  $\frac{\tilde{D}_{v'v'}}{\tilde{D}_{u'u'}} = 1,3 \pm 0,4$ . В указанном отношении второе слагаемое обусловлено суммарными погрешностями измерения кинематических характеристик потока воды (~30%).

Проведем численную оценку искомого отношения на примере опыта {8,10} ПК р. Тору-Айгыр. Кроме того, для более полной уверенности в правильности получаемых результатов оценим также величину «смешанного» отношения  $\tilde{D}_{v'v'}/\tilde{D}_{\Pi}$ , где

$$\tilde{D}_{\Pi} = \overline{\tilde{y}_2^{1/m} - \tilde{y}_1^{1/m}}^2, \quad m=4 \text{ для указанного опыта.}$$

Результаты расчетов приведены в Таблице 1, 2 на Рисунке 1, 2.

Таблица 1.

ОТНОШЕНИЕ  $\tilde{D}_{v'v'}/\tilde{D}_{u'u'}$  ДЛЯ ОСНОВНОЙ ЧАСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ВОДЫ

$\frac{\tilde{y}_2 + \tilde{y}_1}{2}$	$\tilde{D}_{u'u'}$	$\tilde{D}_{v'v'}$	$\tilde{D}_{v'v'}/\tilde{D}_{u'u'}$
0,9900	$6,78 \cdot 10^{-6}$	0,0030	434,7
0,8750	$6,20 \cdot 10^{-5}$	0,0165	266,51
0,7500	0,0004	0,0586	148,95
0,6500	0,0006	0,0534	90,006
0,5500	0,0009	0,0489	52,286
0,4500	0,0016	0,0458	29,218
0,3650	0,0013	0,0220	17,51
0,2650	0,0025	0,0240	9,7303
0,1750	0,0026	0,0174	6,7213
0,0895	0,0011	0,0088	8,384

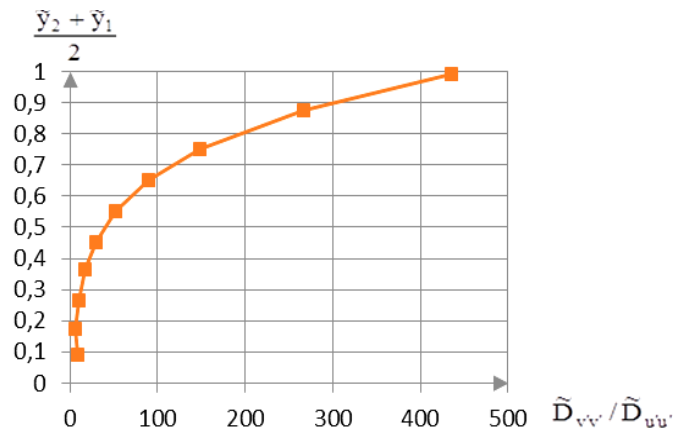


Рисунок 1. Зависимость отношения  $\tilde{D}_{v'v'}/\tilde{D}_{u'u'}$  от вертикальной координаты для основной части турбулентного потока воды.

Таблица 2.

«СМЕШАННОЕ» ОТНОШЕНИЕ  $\tilde{D}_{v'v'}/\tilde{D}_{||}$   
 ДЛЯ ОСНОВНОЙ ЧАСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ВОДЫ

$\frac{\tilde{y}_2 + \tilde{y}_1}{2}$	$\tilde{D}_{  }$	$\tilde{D}_{v'v'}$	$\tilde{D}_{v'v'}/\tilde{D}_{  }$
0,9900	0,000025	0,0030	118,1992
0,8750	0,0002	0,0165	86,4014
0,7500	0,0010	0,0586	60,7803
0,6500	0,0012	0,0534	44,6585
0,5500	0,0015	0,0489	31,7978
0,4500	0,0021	0,0458	22,0012
0,3650	0,0014	0,0220	15,7773
0,2650	0,0023	0,0240	10,6088
0,1750	0,0022	0,0174	8,0793
0,0895	0,0010	0,0088	8,4971

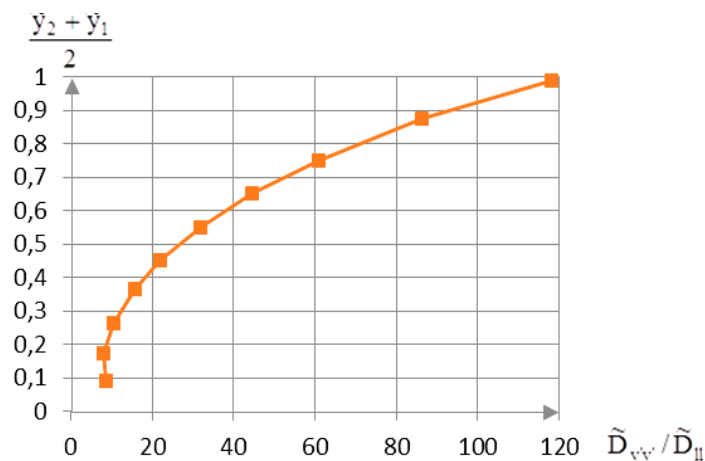


Рисунок 2. Зависимость «смешанного» отношения  $\tilde{D}_{vv} / \tilde{D}_{II}$  от вертикальной координаты для основной части турбулентного потока воды.

Данные расчетов показывают, что искомые отношения превышают значение, прогнозируемое локальной изотропной турбулентностью в 5 раз (I вариант) и 6 раз (II вариант). Указанные данные дают ожидаемо прогнозируемый (тривиальный) результат, а именно, в основной части потока реального турбулентного потока воды отсутствует локальная изотропия течения воды.

Однако, более тщательный анализ физических моделей изотропной турбулентности позволяет с достаточной уверенностью положить, что искомые элементы локальной изотропной турбулентности могут иметь место в ламинарном пограничном слое. Поэтому предлагается проведение измерений пульсаций продольной и вертикальной компонент скорости воды вблизи границы турбулентного и ламинарного пограничных слоев.

В работе [3] проведена оценка толщины ламинарного пограничного слоя, значение которой составила —  $10^{-5}$  м. Отсюда предлагаемый ряд абсолютных значений вертикальных координат для выбора измерительных точек составит интервал от  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$  м (при глубине наполнения канала  $H = 1$  м).

Выбор отдельных пар измерительных точек производим с учетом следующих обстоятельств. В гидродинамике [1] существует понятие длины пути смешения, которая является аналогом длины свободного пробега в явлении физической диффузии. Исходя из этого, отдельные акты обмена каким-либо физическим свойством, например, количеством движения между малыми объемами воды, происходят на протяжении длины пути смешения, т. е. отдельные акты обмена завершаются в конце пути смешения. Поэтому измерения кинематических характеристик отстоящих друг от друга на расстоянии порядка длины пути смешения, будут не зависеть друг от друга.

При выборе отдельных пар измерительных точек указанные обстоятельства учитываются с помощью требования, чтобы измерительные точки в пределах каждой пары отстояли друг от друга на расстоянии порядка длины пути смешения.

Реализация метода выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды иллюстрируется чертежом (Рисунок 3).

Структурная блок-схема метода выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды, приведенная на Рисунке 3, состоит из семи блоков:

блок 1 — выбор объекта исследования;

блок 2 — координатный блок, подразумевает выбор пар измерительных точек и подбор координат соседних точек  $(\tilde{y}_1, \tilde{y}_2)$  каждой пары таким образом, что  $\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1$  порядка относительной длины пути смешения;

блок 3 — блок кинематических характеристик (измерение пульсаций продольной и поперечной компонент скорости воды для каждой пары измерительных точек);

блок 4 — вычисление отношения  $\frac{\tilde{D}_{v'v'}}{\tilde{D}_{u'u'}}$  в выбранных измерительных точках;

блок 5 — графический блок (построение графика зависимости  $\frac{\tilde{D}_{v'v'}}{\tilde{D}_{u'u'}} = \psi\left(\frac{\tilde{y}_2 + \tilde{y}_1}{2}\right)$ );

блок 6 — выявление точки (или точек), где выполняется условие локальной изотропной турбулентности течения воды;

блок 7 — (выход): установление наличия или отсутствия элементов локальной изотропной турбулентности течения воды.



Рисунок 3. Структурная блок–схема метода выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды.

Метод выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды осуществляют следующим образом:

–выбирают объект исследования (блок 1);



–выбирают пары измерительных точек и подбирают координаты соседних точек ( $\tilde{y}_1, \tilde{y}_2$ ) каждой пары таким образом, что  $\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1$  порядка относительной длины пути смещения, тем самым обеспечивают независимость измерений кинематических характеристик в соседних измерительных точках каждой пары. Указанные операции производят в интервале близком к границе турбулентного и ламинарного пограничных слоев ( $\tilde{y} = 10^{-6} \dots 10^{-4}$ ) (блок 2);

–измеряют пульсации продольной и поперечной компонент скорости воды для каждой пары измерительных точек (блок 3);

–вычисляют отношение относительных пульсационных вертикальной и продольной структурных функций  $\frac{\tilde{D}_{v'v'}}{\tilde{D}_{u'u'}}$  в выбранных измерительных точках (блок 4);

–строят график зависимости  $\frac{\tilde{D}_{v'v'}}{\tilde{D}_{u'u'}} = \psi\left(\frac{\tilde{y}_2 + \tilde{y}_1}{2}\right)$  (блок 5);

–выявляют точку (или точки), где выполняется условия локальной изотропной турбулентности течения воды  $\frac{\tilde{D}_{v'v'}}{\tilde{D}_{u'u'}} = 1,3 \pm 0,4$  (блок 6);

–устанавливают наличие или отсутствие элементов локальной изотропной турбулентности течения воды (блок 7).

Эффективность предлагаемого метода выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды определяется повышением его надежности за счет введения, вместо традиционных структурных функций, их пульсационных модификаций.

#### Вывод

Обоснованно введены относительные пульсационные структурные функции и на их основе выявлен предсказуемо ожидаемый результат — отсутствие в основной части реального турбулентного потока воды элементов локально изотропного течения. Предположена вероятность существования в ламинарном пограничном слое элементов локальной изотропии, критерием которой служит отношение вертикальной и продольной пульсационных функций, равная  $1,3 \pm 0,4$ .

#### Список литературы

1. Великанов М. А. Динамика русловых потоков // Структура потока. Т. 1 М.: Гостехиздат, 1954. 323 с.
2. Пресняков К. А., Керимкулова Г. К., Першакова Е. Ю. Способ выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды. Заявка №3510 от 05.04.2019 г. Патент КР на изобретение.
3. Аскалиева Г. О. О динамической скорости водного потока // Проблемы автоматизации и управления. 2014. №1 (26). С. 121-125.

#### References:

1. Velikanov, M. A. (1954). Dinamika ruslovykh potokov. Struktura potoka. Moscow, Gostekhizdat, 323.
2. Presnyakov, K. A., Kerimkulova, G. K., & Pershakova, E. Yu. (2019). Sposob vyyavleniya elementov lokal'no izotropnogo techeniya v turbulentnom potoke vody. Zayavka no. 3510 ot 05.04.2019 g. Patent KR na izobretenie.
3. Askaliyeva, G. O. (2014). About the dynamic speed of water stream. *Problems of automation and control*, 1(26), 121-125.



*Работа поступила  
в редакцию 14.05.2019 г.*

*Принята к публикации  
19.05.2019 г.*

---

*Ссылка для цитирования:*

Пресняков К. А., Керимкулова Г. К., Першакова Е. Ю. Метод выявления элементов локально изотропного течения в турбулентном потоке воды // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №6. С. 12-20. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/01>

*Cite as (APA):*

Presnyakov, K., Kerimkulova, G., & Pershakova, E. (2019). Method to Detect Locally Isotropic Elements in a Water Turbulent Flow. *Bulletin of Science and Practice*, 5(6), 12-20. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/01> (in Russian).