

**05.23.16 Гидравлика и инженерная гидрология**

Оригинальная статья

УДК 502/504:532.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-111-116

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ПРИ ПЛАНОВОМ РАСШИРЕНИИ С ОБРАЗОВАНИЕМ ВОДОВОРОТНЫХ ЗОН**

**КОЗЫРЬ ИРИНА ЕВГЕНЬЕВНА** , канд. техн. наук, доцент  
kozyr\_ira@mail.ru

**ПИКАЛОВА ИРИНА ФЕДОРОВНА**, канд. техн. наук, доцент  
pikalova.if@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49. Россия

*Теория турбулентности является одним из важных разделов динамики открытых потоков. Интерес к экспериментальным исследованиям турбулентности возрос с развитием математического моделирования открытых потоков и необходимостью получения материалов для параметров моделей турбулентности при численном моделировании турбулентных течений. Цель настоящих исследований – изучение характеристик турбулентного потока при плановом расширении с образованием водоворотных зон и получение практических рекомендаций по анализу и расчету кинематической структуры таких потоков. Использовался экспериментальный метод исследований. Получены графики для определения турбулентных касательных напряжений на границе раздела, даны зависимости для определения коэффициентов турбулентного перемешивания. Выявлены зоны интенсивной пульсации скорости, что представляет практический интерес, позволяет предсказать увеличение размывающей способности потока в этих местах, получить рекомендации по укреплению русла и гашению энергии в нижнем бьефе. Результаты позволяют использовать данные при дальнейшем изучении условий зарождения, развития и затухания турбулентности, рассмотреть механизм трансформации энергии турбулентности.*

**Ключевые слова:** характеристики турбулентности, экспериментальные исследования, касательные напряжения, водоворотные зоны, пульсации скорости, коэффициент турбулентного перемешивания, спокойное состояние потока, бурное состояние потока

**Формат цитирования:** Козырь И.Е., Пикалова И.Ф. Характеристики турбулентного потока при плановом расширении с образованием водоворотных зон // Природообустройство. – 2021. – № 3. – С. 111-116. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-111-116.

© Козырь И.Е., Пикалова И.Ф., 2021

Scientific article

**CHARACTERISTICS OF TURBULENT FLOW IN THE PLANNED EXPANSION WITH THE FORMATION OF WHIRLPOOL ZONES**

**KOZYR IRINA EVGENJEVNA** , candidate of technical sciences, associate professor  
kozyr\_ira@mail.ru

**PIKALOVA IRINA FEDOROVNA**, candidate of technical sciences, associate  
pikalova.if@mail.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49. Russia

*Theory of turbulence is an important part of the open flow dynamics. The interest in the research of experimental turbulence increased with the development of mathematical*

modeling of open flows and the need to obtain materials for the parameters of turbulence models, with numerical modeling of turbulent flows. The purpose of this research was to study characteristics of the turbulent flow during the planned expansion with the formation of whirlpool zones and to obtain practical recommendations for the analysis and calculation of the kinematic structure of such flows. There was used an experimental research method. Experimental graphs for determining the turbulent shear stresses at the interface were obtained and dependences were given for determining the coefficients of turbulent mixing. There were identified zones of intense pulsation of speed which is of a practical interest and allows to predict an increase in the erosion ability of the flow in these places and to obtain recommendations for strengthening the channel and extinguishing energy in the downstream. The results allow us to use this data in further study of the conditions of origination, development and decaying of turbulence, to consider the mechanism of turbulence of energy transformation.

**Keywords:** turbulence characteristics, experimental research, sparing stresses, whirlpool zones, speed pulsations, factor of turbulent mixing, calm state of the flow, turbulent state of the flow

**Format of citation:** Kozyr I.E., Pikalova I.F. Characteristics of turbulent flow in the planned expansion with the formation of whirlpool zones // Prirodoobustrojstvo. – 2021. – № 3. – S. 111-116. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-111-116.

**Введение.** Теория турбулентности является одним из важных разделов динамики открытых потоков. Роль турбулентности в процессах рассеивания энергии, в формировании гидравлических сопротивлений, турбулентной диффузии велика. Интерес к экспериментальным исследованиям турбулентности увеличился с развитием математического моделирования открытых потоков и необходимостью получения материалов для параметров моделей турбулентности при численном моделировании турбулентных течений [1, 2].

При движении турбулентного потока в условиях внезапного расширения русла для построения плана течений необходимо решать задачу о растекании потока с образованием водоворотных зон. Для анализа и расчета необходимо схематизировать картину растекания потока с учетом характерных особенностей явления. Одним из таких особенностей является взаимодействие между струей и водоворотными областями, вызывающее интенсивный обмен вихревыми массами на участке растекания и возникновение касательных напряжений на границах раздела. В связи с этим целями исследований явились изучение характеристик турбулентного потока при плановом расширении с образованием водоворотных зон и получение практических рекомендаций по анализу и расчету кинематической структуры таких потоков. Для этого определялись пульсационные характеристики скорости и касательные напряжения между транзитной струей и водоворотом.

В работе рассматриваются расширяющиеся потоки, находящиеся в спокойном и бурном состояниях. В первом случае это обтекание глухой русловой плотины с пропуском паводка по пойме (рис. 1), во втором случае – одностороннее расширение бурного потока при истечении из-под затвора (рис. 2).

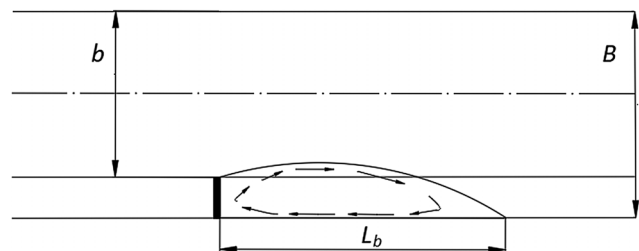


Рис. 1. Движение спокойного потока при внезапном расширении русла в случае обтекания глухой русловой плотины

Fig. 1. Movement of calm flow in case of sudden expansion of the channel in flowing along a blind channel dam

Использовался экспериментальный метод исследований. Исследования проводились в лаборатории гидравлики Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова, в прямоугольных лотках шириной  $B = 200$  см и  $B = 30$  см. Опыты проводились на моделях при относительном расширении потоков  $B/b = 1,1$  (спокойное состояние) и  $B/b = 4$  (бурное состояние) и числах Фруда в сжатом сечении – соответственно  $Fr = 0.2 - 0.3$  и  $Fr = 10 - 24$ .

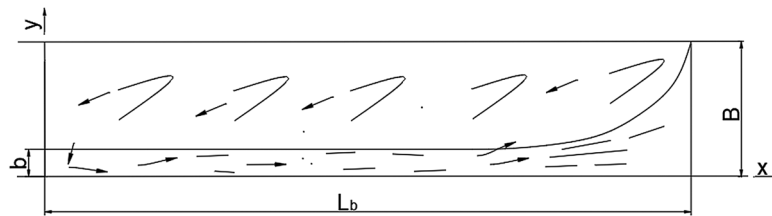


Рис. 2. Движение бурного потока при внезапном расширении русла

Fig. 2. Movement of turbulent flow in case of sudden expansion of the channel

Исследования турбулентной структуры расширяющегося потока были направлены на изучение сопротивления на границе раздела между транзитной струей и плановым водоворотом, что позволяет изучить процесс взаимодействия между ними. Как известно, турбулентные касательные напряжения выражаются зависимостью

$$\tau = -\rho \overline{U'xU'y}, \quad (1)$$

где  $U'x$  и  $U'y$  – пульсационные составляющие продольной и поперечной скорости.

Измерение пульсационных характеристик производилось с помощью двухкомпонентного тензодатчика. После статистической обработки опытных данных получены среднеквадратичные отклонения продольной и поперечной составляющих пульсационной скорости ( $U'x$ ,  $U'y$ ) и моменты корреляции этих скоростей  $U'xU'y$ .

Изучение распределения в плане значений стандартов пульсации показало, как и следовало ожидать, их наибольшее значение на границе раздела между транзитным потоком и водоворотом. Изменения стандартов продольной пульсации, отнесенных к средней скорости потока в начальном сечении, показаны на рисунках 3 (спокойное состояние) и 4 (бурное состояние).

Экспериментально получено, что на начальном участке струи стандарты продольных пульсаций скорости достигают максимального значения вблизи сооружения, на расстоянии примерно  $0.09L_b$ . Эта зона наиболее интенсивного взаимодействия струи и водоворота. От точки максимума значения стандартов пульсации скорости резко снижаются, а затем плавно уменьшаются к концу расширения струи (рис. 4). При меньших числах Фруда сохраняется такой же характер изменения стандартов продольных пульсаций скорости по длине планового водоворота (рис. 3).

Турбулентные касательные напряжения являются важной характеристикой турбулентной структуры, поскольку они

определяют рассеивание энергии в потоке, обусловленное наличием поперечных перемещений вихревых масс.

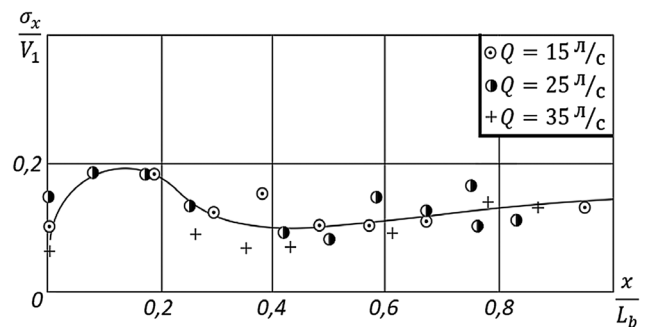


Рис. 3. Изменение относительной величины стандарта пульсации скорости вдоль границы струи и планового водоворота в спокойном потоке

Fig. 3. Changing of the relative value of the standard of the speed pulsation along the jet boundary and the planned whirlpool in the calm flow

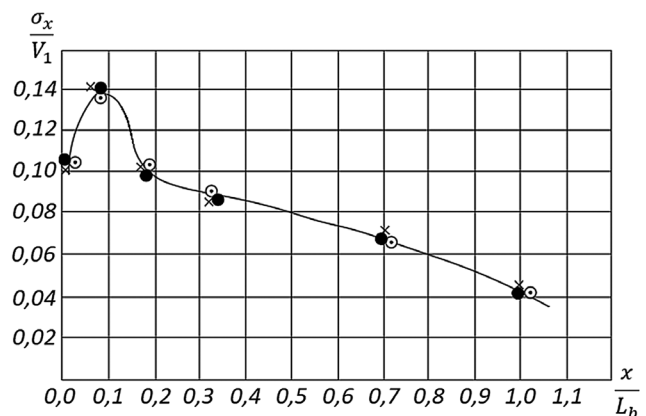


Рис. 4. Изменение относительной величины стандарта пульсации скорости вдоль границы струи и планового водоворота в бурном потоке

Fig. 4. Changing of the relative value of the standard of the speed pulsation along the jet boundary and the planned whirlpool in the turbulent flow

На рисунке 5 приведены кривые, характеризующие изменение моментов корреляции

продольной и поперечной составляющих пульсационной скорости  $U'xU'y$ , которым пропорционально касательное турбулентное напряжение  $\tau = -\rho \overline{U'xU'y}$  вдоль линии раздела транзитной струи. Из этих данных следует, что значение касательного турбулентного напряжения вдоль линии раздела для бурного потока не является постоянным: в начальной части струи величина  $\tau$  убывает, затем достигает максимального значения в сечении  $1/6$  части длины планового водоворота  $L_b$ , затем  $\tau$  уменьшается. Местоположение сечения с максимальным значением  $\tau$  остается постоянным для всех чисел  $Fr_1$  и совпадает со створом, в котором происходит интенсивный обмен массами между транзитной струей и водоворотом и в котором величины скоростей на границе струи и водоворота имеют наибольшее значение.

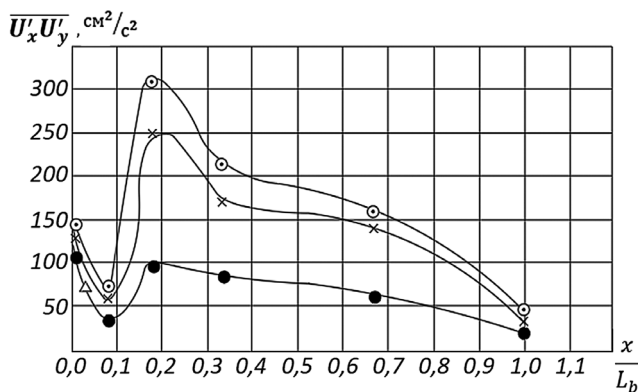


Рис. 5. Изменение момента корреляции продольной и поперечной составляющих пульсаций скорости вдоль границы раздела в бурном потоке

Fig. 5. Change of the correlation moment of longitudinal and transverse components of speed pulsations along the boundary of the section in the turbulent flow

Сопоставление полученных данных с данными других исследователей показывает, что характер изменения турбулентных касательных напряжений на границе раздела в спокойном потоке (с числами Фруда в начальном сечении меньше единицы) является иным по сравнению с бурным потоком ( $Fr_1 = 10 - 24$ ), без ярко выраженных максимумов и минимумов. Это подтверждается и нашими исследованиями для спокойного потока (рис. 6). Величина касательного турбулентного напряжения, как показывают опыты, являются функцией числа Фруда в начальном сечении  $Fr_1$  и, по-видимому, функцией относительного расширения потока. Анализ опытных данных также

свидетельствует о том, что касательные турбулентные напряжения, полученные на линии раздела, существенно превышают напряжения, вызываемые трением по гладкому дну.

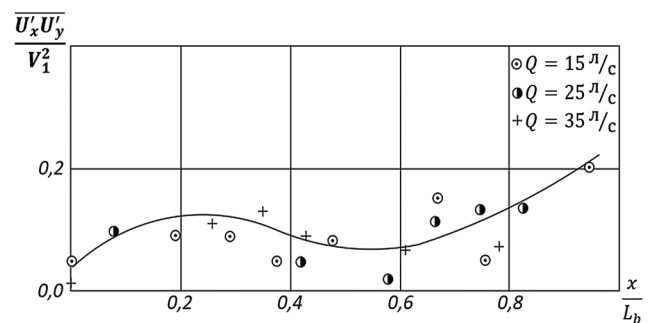


Рис. 6. Изменение момента корреляции продольной и поперечной составляющих пульсаций скорости вдоль границы раздела в спокойном потоке

Fig. 6. Change of the correlation moment of the longitudinal and transverse components of speed pulsations along the boundary of the section in the turbulent flow

Незамкнутость системы уравнений движения и неразрывности для потоков турбулентного режима привела к разработке ряда гипотез [3, 4]. Одной из них является концепция, основанная на введении в расчеты так называемого коэффициента турбулентного обмена. Этот коэффициент предложен Ж. Буссинеском по аналогии с коэффициентом динамической вязкости, и его часто называют коэффициентом турбулентной вязкости. Тогда формула для касательных напряжений в турбулентном потоке принимает вид:

$$\tau = \rho \varepsilon_1 du / dy,$$

где  $\varepsilon_1$  – коэффициент турбулентного перемешивания.

Величина коэффициент турбулентного перемешивания определялась обратным расчетом по экспериментальным данным на основе измеренных касательных напряжений и поперечных градиентов скорости  $du / dy$ .

Из анализа опытных данных следует, что коэффициент турбулентного перемешивания непрерывно изменяется вдоль линии раздела. Для практических расчетов коэффициент  $\varepsilon_1$  представлен в безразмерном виде [5] с помощью выражения

$$\sqrt{\varepsilon_1'} = \frac{\varepsilon_1}{L_b^2 \frac{\partial V}{\partial y}} = f\left(\frac{x}{L_b}\right), \quad (2)$$

где  $L_b$  – длина планового водоворота

На рисунке 7 представлена искомая функция. На участке, равном  $2/3 L_b$ , значение величины  $\sqrt{\varepsilon'_1}$  остается практически постоянным, а на участке резкого расширения струи до полной ширины нижнего бьефа значение  $\sqrt{\varepsilon'_1}$  резко возрастает. Весьма существенно, что рассматриваемую функцию, по нашим опытным данным, можно считать в первом приближении не зависящей от чисел Фруда.

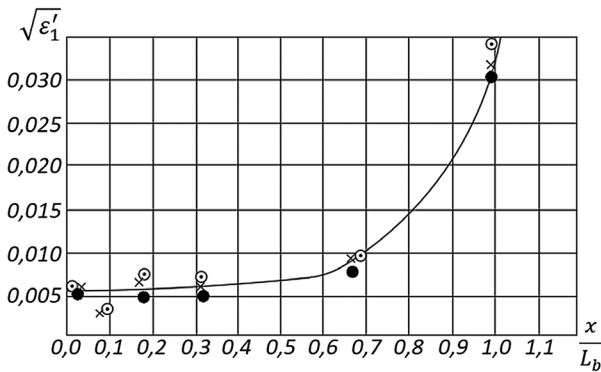


Рис. 7. Зависимость  $\sqrt{\varepsilon'_1} = f\left(\frac{x}{L_b}\right)$

Fig. 7. Dependence  $\sqrt{\varepsilon'_1} = f\left(\frac{x}{L_b}\right)$

При решении плановой задачи отрывного движения открытых потоков часто для определения касательных напряжений используют гипотезу Рейхарда-Коновалова [6]:

$$\tau = -\rho \overline{U'xU'y} = \alpha^2 x du^2 / dy, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности;  $x$  – расстояние от начала расширения.

Величину коэффициента  $\alpha$  для планового пограничного слоя смешения в отрывных течениях И.А. Шеренков [7] рекомендует принимать 0.04, что соответствует опытным значениям этого коэффициента, полученным для свободных турбулентных струй. Однако, известно, что величина коэффициента  $\alpha$  в ограниченных струйных потоках имеет большее значение, достигающее до 0.08 [8]. Непосредственного определения величины  $\alpha$  по измеренным турбулентным напряжениям при этом не производилось.

По данным наших опытов при относительном расширении потока  $B/b = 1,1$  (спокойное состояние) сделан расчет коэффициента  $\alpha$ , результаты которого приведены на рисунке 8.

Из рисунка следует, что значения исследуемого коэффициента, строго говоря, не остаются постоянными по всей длине зоны расширения потока. Однако на данном

этапе исследований будем полагать, что его величина мало меняется по длине и имеет значение, равное 0.085.

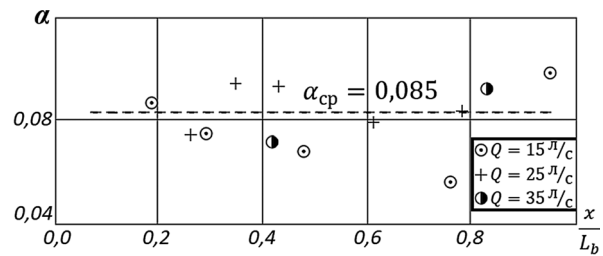


Рис. 8. Зависимость  $\alpha = f(x | L_b)$

Fig. 8. Dependence  $\alpha = f(x | L_b)$

Для определения влияния на коэффициент  $\alpha$  степени расширения потока в прямоугольных руслах нами использованы экспериментальные данные других авторов. Коэффициенты были рассчитаны по плановым эюрам скоростей и касательным напряжениям на границе раздела между транзитной струей и водоворотной зоной [9, 10].

По построенной зависимости (рис. 9) наблюдается значительное уменьшение коэффициента  $\alpha$  при увеличении степени расширения. Отмечая приближенный характер кривой, необходимо подчеркнуть ее практическую ценность, заключающуюся в возможности получения значения коэффициента  $\alpha$  для ограниченного струйного потока, то есть в условиях, отличающихся от наиболее изученных условий расширения струи в безграничном пространстве.

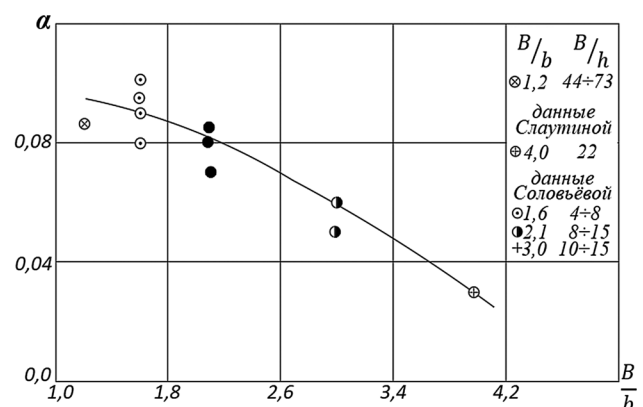


Рис. 9. Зависимость  $\alpha = f(B | b)$

Fig. 9. Dependence  $\alpha = f(B | b)$

### Выводы

1. Полученные экспериментальные графики для определения турбулентных касательных напряжений на границе

раздела характеризуют процесс взаимодействия транзитной струи и планового водоворота и позволяют в дальнейшем использовать их при изучении условий зарождения, развития и затухания турбулентности, рассмотреть механизм трансформации энергии турбулентности по всей границе транзитной струи и планового водоворота.

2. Выявлены зоны интенсивной пульсации скорости, что представляет большой

### Библиографический список

1. **Гринвальд Д.И.** Турбулентность русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 166 с.
2. **Высоцкий Л.И., Высоцкий И.С.** Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки. – СПб.: Лань, 2015. – 672 с.
3. **Штеренлихт Д.В.** Гидравлика: Учебник. – СПб.: Лань, 2015. – 656 с.
4. **Барышников Н.Б.** Динамика русловых потоков: учебник. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – СПб.: РГГМУ, 2016. – 342 с.
5. **Козырь И.Е.** Структура турбулентности на участке расширения сбойной струи // Труды XV Международной научно-практической конференции «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». – Новосибирск, 2015. – № 9. – С. 84-88.
6. **Гришанин К.В.** Основы динамики русловых потоков. – М.: Транспорт, 1990. – 319 с.
7. **Шеренков И.А.** Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков. – М.: Энергия, 1978. – 240 с.
8. **Ширшов А.Н.** Численные методы в гидравлике нижнего бьефа. – М.: Энергия, 1974. – 116 с.
9. **Пикалова И.Ф.** Характеристики турбулентности пойменного потока, обтекающего русловые сооружения // Гидравлика: Сборник научных трудов. – Т. 68. – М.: Изд-во МГМИ, 1981.
10. **Sam R.G., Lessman R.C.** An experimental study of flow over a rectangular body // J. Fluids Engin. – 1979. – vol. 101. – pp. 443-448.

### Критерии авторства

Козырь И.Е., Пикалова И.Ф. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись.

Козырь И.Е., Пикалова И.Ф. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию: 04.04.2021 г.

Одобрена после рецензирования 20.05.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

практический интерес, так как позволяет предусмотреть увеличение размывающей способности потока в этих местах, получить рекомендации по укреплению русла и гашению энергии в нижнем бьефе.

3. Даны зависимости для определения коэффициентов турбулентного перемешивания, необходимые для расчета поля скоростей в транзитной струе при внезапном расширении потока.

### References

1. **Grinvald D.I.** Turbulentnost ruslovyh potokov. – L.: Gidrometeoizdat, 1974. – 166 s.
2. **Vysotskij L.I., Vysotskij I.S.** Prodolno-odnorodnye osrednennye turbulentnye potoki. – SPb.: Lan, 2015. – 672 s.
3. **Shterenliht D.V.** Gidravlika: uchebnik. – SPb.: Lan, 2015. – 656 s.
4. **Baryshnikov N.B.** Dinamika ruslovyh potokov: uchebnik. Izd. 2-e, pererab. i dop. – SPb.: RGGMU, 2016. – 342 s.
5. **Kozyr I.E.** Struktura turbulentnosti na uchastke rasshireniya sbojnoj strui. / Trudy XV Mezhdun. nauch.-prakt. konf. «Nauchnye perspektivy XXI veka. Dostizheniya i perspektivy novogo stoletiya». T. 9. – Novosibirsk: 2015. — S. 84-88.
6. **Grishanin K.V.** Osnovnye dinamiki ruslovyh potokov. – M.: Transport, 1990. – 319 s.
7. **Sherenkov I.A.** Applied planned problems of hydraulics of calm flows. – M.: Energiya, 1978. – 240 s.
8. **Shirshov A.N.** Numerical methods in downstream hydraulics. – M.: Energiya, 1974. – 116 s.
9. **Pikalova I.F.** Harakteristiki turbulentnosti pojmennogo potoka, obtekayushchego ruslovye sooruzheniya / Sb. nauchnyh trudov. t. 68. Gidravlika. – M.: Izd. MGMI, 1981.
10. **Sam R.G., Lessman R.C.** An experimental study of flow over a rectangular body // J. Fluids Engin. – 1979. – vol. 101. – pp. 443-448.

### Criteria of authorship

Kozyr I.E., Pikalova I.F. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript.

Kozyr I.E., Pikalova I. F have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

### Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 04.04.2021

Approved after reviewing 20.05.2021

Accepted for publication 28.06.2021