

ISSN 1561-8323 (Print)  
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 536.524  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-627-632>

Поступило в редакцию 23.05.2019  
Received 23.05.2019

В. Л. Жданов<sup>1</sup>, Д. А. Иванов<sup>1</sup>, Я. И. Смольский<sup>2</sup>, В. И. Терехов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация

## ТУРБУЛЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗВИТОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В КАНАЛЕ

(Представлено академиком О. Г. Пенязьковым)

**Аннотация.** Методом крупных вихрей (LES) с использованием пакета OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) выполнен расчет и анализ средней скорости, пульсаций, пространственных корреляций пульсаций скорости и волновых спектров пульсаций компонент скорости в развитом трехмерном турбулентном пограничном слое. Пограничный слой формировался при течении воды со средней скоростью 0,3 м/с в плоском канале размерами  $50 \times 125 \times 850$  мм (высота, ширина и длина соответственно). Скорость на входе в канал задавалась по закону  $1/7$ . Число Рейнольдса, рассчитанное по половине высоты канала, равнялось 7500. Расчеты выполнены на двух координатах  $y^+ = 10$  и  $40$ , т. е. в буферной и логарифмической областях пограничного слоя. Исследования показали, что в буферной области формируются вихревые структуры, которые сохраняют свою идентификацию и в начале логарифмической области ( $y^+ = 40$ ). Эти структуры формируют пакеты из вихрей различного масштаба. Размер этих пакетов в поперечном сечении существенно меньше, чем их длина. Дискретные пакеты слабо взаимодействуют между собой поперек пограничного слоя, что проявляется в постоянстве энергетического спектра в широком интервале волновых чисел.

**Ключевые слова:** пограничный слой, пульсации, корреляции пульсаций, спектры пульсаций

**Для цитирования:** Турбулентные характеристики развитого пограничного слоя в канале / В. Л. Жданов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 627–632. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-627-632>

Valery L. Zhdanov<sup>1</sup>, Dmitry A. Ivanov<sup>1</sup>, Jaroslav I. Smulskij<sup>2</sup>, Viktor I. Terekhov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

## TURBULENT CHARACTERISTICS OF THE DEVELOPED BOUNDARY LAYER IN THE CHANNEL

(Communicated by Academician Oleg G. Penyazkov)

**Abstract.** Mean velocity, fluctuations, spatial correlations and wave number spectra were calculated and analyzed by the LES method using the software OpenFOAM for solution of the task of the developed 3D turbulent boundary layer. The layer was formed in water flowing in the  $50 \times 125 \times 850$  mm flat channel (height, width and length, respectively) at a mean entrance velocity of 0.3 m/s that results in the Reynolds number based on the half channel height equal to 7500. The velocity profile at the channel entrance was set by the law  $1/7$ . The turbulent parameters were calculated on two coordinates:  $y^+ = 10$  and  $40$ , i. e. in the buffer and logarithmic regions of the boundary layer. The study showed that the vortex structures were generated in the buffer region; they were still identified at the beginning of the logarithmic region ( $y^+ = 40$ ). These structures form vortex packets whose scale in the transverse direction is much less than their length. The vortex packets weakly interact with each other in the transverse direction, which results in an almost constancy of the energy spectrum within a broad wave number range.

**Keywords:** turbulent boundary layer, LES, spatial correlation, wave number spectra

**For citation:** Zhdanov V. L., Ivanov D. A., Smulskij Ja. I., Terekhov V. I. Turbulent characteristics of the developed boundary layer in the channel. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 5, pp. 627–632 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-627-632>

**Введение.** Турбулентные пограничные слои развиваются на поверхностях многих инженерных конструкций: от теплообменных устройств, элементов воздушно-реактивных двигателей до планеров самолетов, корпусов кораблей и крупных строительных сооружений. Они определяют как сопротивление трения, например, 100 % потерь в трубопроводах, так и перенос тепла. Вих-

ревая структура этих слоев открывает возможность ее изменения путем воздействия на процесс формирования вихрей. Для эффективного управления снижением сопротивления трения или теплообменом необходимо понимание процесса зарождения и развития вихрей, непосредственно примыкающих к поверхности. Структуру развитого пограничного слоя условно можно разделить на внешнюю область, контактирующую с ядром основного потока, и внутреннюю, примыкающую к поверхности. Эта внутренняя область в свою очередь включает в себя область, в которой скорость изменяется пропорционально логарифму расстояния от поверхности (логарифмическая область), буферную область и ламинарный подслой. Последний чрезвычайно тонкий (1–2 % толщины пограничного слоя) и скорость в нем убывает пропорционально его высоте. Это обстоятельство позволяет определять величину напряжения сдвига на поверхности ( $\tau_w = \mu(\Delta U / \Delta y)$ , где  $\mu$  – молекулярная вязкость среды;  $U$  – средняя скорость в подслое;  $y$  – расстояние до поверхности), измеряя профиль скорости у стенки.

Очевидно, что с изменением скорости обтекания толщина пограничного слоя изменяется. Приведение параметров пограничного слоя к безразмерной форме позволяет анализировать и сопоставлять между собой турбулентные пограничные слои, полученные при различных числах Рейнольдса. В качестве коэффициента нормировки используется скорость торможения (динамическая скорость)  $u_\tau = (\tau_w / \rho)^{0.5}$ , где  $\rho$  – плотность среды. В этом случае безразмерная скорость и безразмерные координаты по высоте и по длине пограничного слоя представляются в виде:  $u^+ = U / u_\tau$ ,  $y^+ = y u_\tau / \nu$  и  $x^+ = x u_\tau / \nu$ , где  $\nu$  – кинематическая вязкость.

На границе вязкого ламинарного подслоя и буферной области генерируется неустойчивость, которая под воздействием градиента скорости трансформируется сначала в поперечный вихрь, а затем в  $\Omega$ -образную структуру [1; 2]. В своем развитии структура увеличивается в размере и поднимается к внешней границе пограничного слоя. Ее нижняя часть остается у поверхности и генерирует к ней потоки среды с более высокой скоростью, что и вызывает рост сдвиговых напряжений.

Цель работы – определение статистических турбулентных характеристик внутренней области пограничного слоя, которые отражают параметрические особенности зарождающихся вихревых структур.

**Материалы и методы исследования.** Исследовался турбулентный пограничный слой, формирующийся в плоском канале высотой 50 мм, шириной 125 мм и длиной 850 мм при течении воды. Для ускорения формирования турбулентного пограничного слоя в начале канала на нижней поверхности устанавливался стержень диаметром 3 мм.

Расчет трехмерных полей скорости был выполнен с применением программного пакета OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) методом крупных вихрей (LES). Модель одного уравнения использовалась для расчета вихревой вязкости [3; 4]. Этот пакет использует метод конечных объемов для решения системы уравнений в частных производных. В отличие от наиболее широко распространенного метода расчета полей скорости RANS, применяемого для стационарных течений, метод LES позволяет выделять в потоке вихревые составляющие и получать нестационарную картину распределения скорости.

Расчетная сетка покрывала половину высоты канала на длине 850 мм с переменными размерами ячеек, которые увеличивались в сторону внешней границы пограничного слоя. Общее число ячеек 26643260, минимальный вертикальный размер ячейки у стенки  $8,3 \cdot 10^{-5}$  м. Расстояние первой ячейки от поверхности  $y^+ = 1,21$ . Размеры сетки выбраны из предварительного анализа влияния их размеров на расчетные значения параметров течения и напряжения сдвига.

На входе в канал задавался профиль скорости закона  $1/7$ , характерный для турбулентного течения. На нижней поверхности канала принято условие прилипания, а на верхней – проскальзывания среды. На выходе канала градиенты скорости и давления равны нулю. Начальная скорость потока  $U = 0,3$  м/с, что соответствовало числу Рейнольдса, рассчитанного по половине высоты ( $h$ ) канала,  $Re = 7500$ . Значения плотности и вязкости воды принимались для комнатной температуры, а среда рассматривалась как несжимаемая.

**Результаты и их обсуждение.** *Средние и пульсационные характеристики.* Профили средней скорости, вычисленные на различном расстоянии от входа в канал, установили начало формирования развитого пограничного слоя (рис. 1, а).

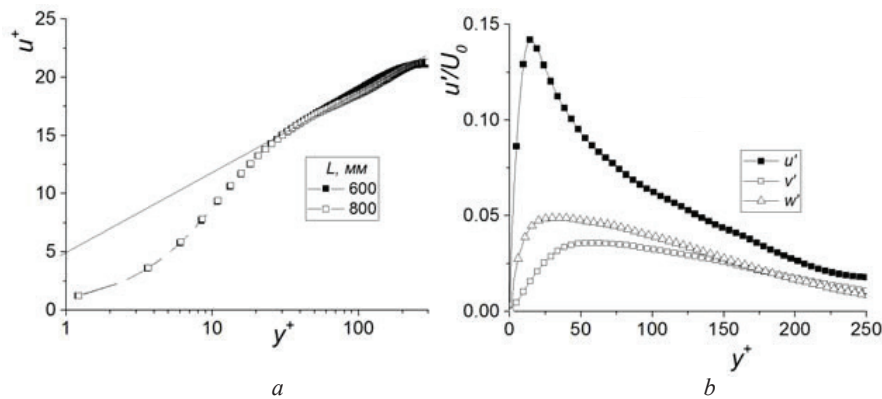


Рис. 1. Профили скорости (a), нормированные на скорость торможения  $u_\tau$ , и пульсации (b) поперек пограничного слоя на расстоянии 600 мм от начала канала

Fig. 1. Wall-normal profiles of the mean velocity (a) and the velocity fluctuation intensity (b) across a boundary layer at the distance 600 mm from the beginning of the channel

Развитый турбулентный слой (толщина  $\delta = 0,025$  м, форм-фактор  $H = 1,45$ , скорость  $u_\tau = 0,014$  м/с) формируется с расстояния 600 мм от начала канала (рис. 1, a). Профиль скорости в логарифмической области аппроксимируется зависимостью  $u^+ = k \ln y^+ + C$ , где  $k = 0,44$ ,  $C = 5,0$ . Эти коэффициенты коррелируют с данными работ [5; 6]. Логарифмическая область простирается от  $y^+ = 120$  до 30, где начинается буферная область, оканчивающаяся на координате  $y^+ \leq 5$ .

Профили турбулентных пульсаций компонент скорости заметно различаются по высоте развитого пограничного слоя (рис. 1, b). Максимумы пульсаций разнесены по высоте пограничного слоя:  $y^+ \sim 13$  ( $u'$ ),  $y^+ \sim 31$  ( $w'$ ) и  $y^+ \sim 55$  ( $v'$ ), т. е. продольные пульсации генерируются в буферной области, тогда как нормальные и поперечные пульсации – в логарифмической области. Эти координаты максимумов коррелируют с соответствующими ( $y^+ \sim 13$  и 20 для  $u'$  и  $w'$ , и  $y^+ \sim 55$  для  $v'$ ), полученными в экспериментальных исследованиях [6; 7]. Соотношение максимумов пульсаций  $u' / w' = 2,9$  (2,8),  $u' / v' = 3,96$  (3,75) и  $w'v' = 1,37$  (1,3) так же вполне согласуются с данными отмеченных работ. Число Рейнольдса, рассчитанное по толщине потери импульса  $Re_\theta = 454$  близко к числу  $Re_\theta = 481$  в [6].

Рост продольных пульсаций, очевидно, вызван перемещением высокоскоростной среды в буферную область из логарифмической области, где наблюдался максимум нормальных пульсаций. Максимум поперечных пульсаций на границе буферной и логарифмической областей вызван, по-видимому, взаимодействием формирующихся вихревых структур в начале логарифмической области.

*Двухточечные пространственные корреляции.* Информация о параметрах генерируемых структур может быть получена из анализа коэффициента двухточечной корреляции пульсаций:

$$R = \frac{\overline{u'(x, t)u'(x + r, t)}}{u'^2(x)u'^2(x + r)}.$$

Эти коэффициенты были рассчитаны для трех компонент пульсаций скорости на двух координатах  $y^+ = 10$  и 40 (рис. 2).

Корреляционные кривые  $R_{11}$  и  $R_{22}$  на расстоянии  $y^+ = 10$  пересекают ось абсцисс на координате  $x^+ \sim 550$ , но с различными наклонами, что отражает разницу в диапазоне масштабов вихрей, формирующихся в нормальном и продольном направлении потока. Зависимость  $R_{33}$ , пересекающая ось  $x^+$  немного раньше, указывает на меньший характерный размер структур в поперечном направлении. Диапазон масштабов вихревых структур в направлении течения увеличивается с удалением от поверхности ( $y^+ = 40$ ), слабо изменяется в нормальном и уменьшается в поперечном направлении (рис. 2, c). Корреляционные зависимости в направлении  $z^+$  принимают нулевые

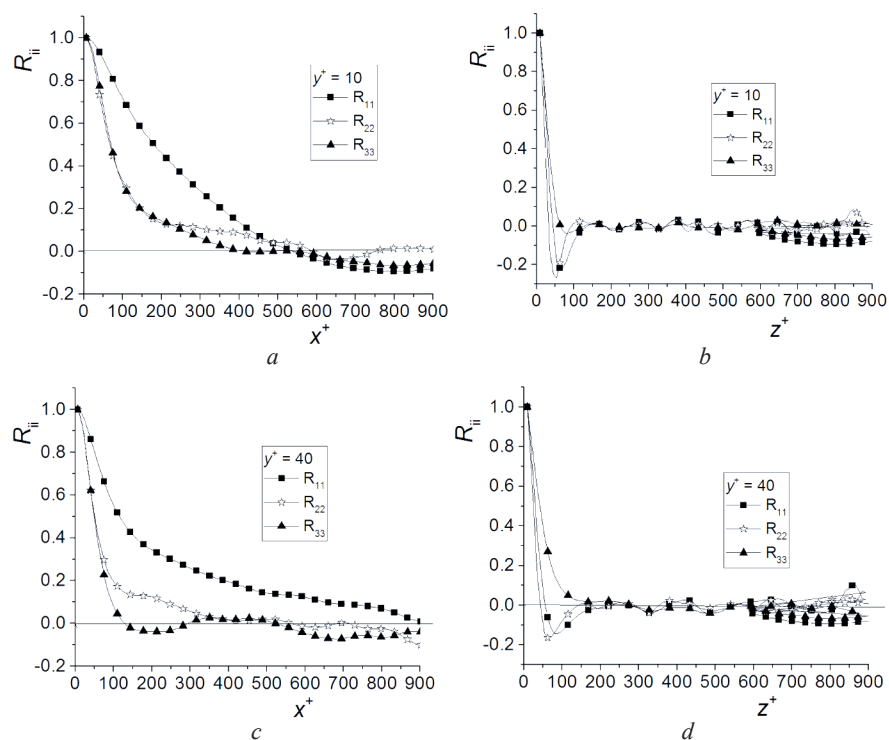


Рис. 2. Коэффициенты корреляции пульсаций скорости на координатах  $y^+ = 10$  и  $40$  вдоль ( $a, c$ ) и поперек ( $b, d$ ) пограничного слоя

Fig. 2. Two-point correlations at  $y^+ = 10$  and  $40$ : streamwise separations ( $a, c$ ); spanwise separations ( $b, d$ )

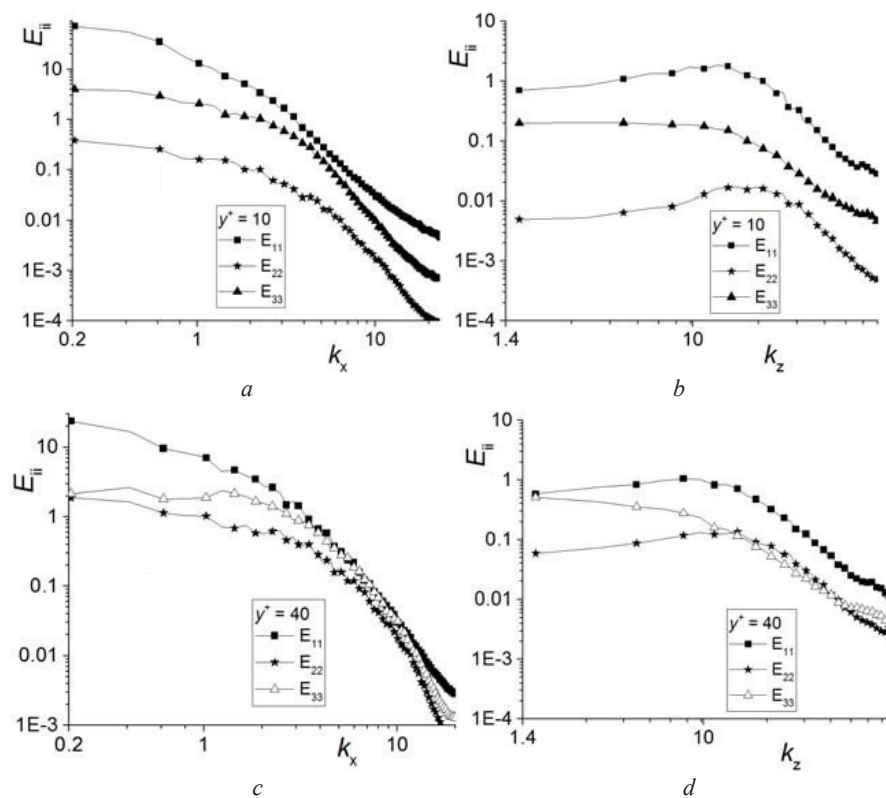


Рис. 3. Волновые спектры пульсаций скорости на координатах  $y^+ = 10$  и  $40$  вдоль ( $a, c$ ) и поперек ( $b, d$ ) пограничного слоя

Fig. 3. One-dimensional energy spectra at  $y^+ = 10$  and  $40$ : streamwise separations ( $a, c$ ); spanwise separations ( $b, d$ )

значения на очень малом расстоянии, характеризуя существенно меньшие размеры вихревых структур поперек пограничного слоя, которые несколько увеличиваются с удалением от поверхности (рис. 2, *b, d*).

**Волновые спектры пульсаций.** Спектры построены для тех же координат  $y^+$ , что и корреляционные зависимости (рис. 3).

Максимальная энергия сосредоточена на малых волновых числах, т. е. в крупных вихревых структурах. Сравнительно быстрое уменьшение энергии с ростом волновых чисел в направлении течения на координатах  $y^+ = 10$  и 40 отражает широкий спектр масштабов, обеспечивающий транспорт энергии от крупных к мелким вихревым структурам (рис. 3, *a*). С удалением от поверхности максимальная энергия продольных ( $E_{11}$ ) и поперечных ( $E_{33}$ ) пульсаций падает (в четыре раза), а нормальных пульсаций симметрично возрастает (рис. 3, *c*). Интервал волновых чисел, на которых энергия пульсаций вырождается, сокращается практически одинаково для всех компонент  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  и  $E_{33}$ .

Спектры по оси  $z$  отличаются, прежде всего, постоянством энергии в широком интервале волновых чисел (рис. 3, *b, d*). Это предполагает структуру течения, в котором дискретные пакеты вихревых структур различного размера слабо взаимодействуют между собой. Пакеты меньших размеров, очевидно, преобладают, что объясняет максимум на меньших волновых числах. Как показали корреляционные кривые, характерный размер пакетов вихревых структур почти на порядок меньше характерного размера структур в направлении оси  $x$ . На координате  $y^+ = 40$  энергия продольных пульсаций на малых волновых числах несколько уменьшается, а нормальных и поперечных пульсаций увеличивается, но вырождение  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  и  $E_{33}$  замедляется.

**Заключение.** Исследования показали, что в буферной области на координате  $y^+ \sim 10$  формируются вихревые структуры, которые сохраняют свою идентификацию и в начале логарифмической области ( $y^+ = 40$ ). Эти структуры группируются в пакеты, которые слабо взаимодействуют между собой поперек пограничного слоя вплоть до начала логарифмической области.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (грант T18P-018) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-58-00011).

**Acknowledgements.** The work was sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant T18P-018) and the Russian Foundation for Fundamental Research (grant 18-58-00011).

### Список использованных источников

1. Zhou, J. Autogeneration of near-wall vortical structures in channel flow / J. Zhou, R. J. Adrian, S. Balachandar // *Phys. Fluids*. – 1996. – Vol. 8, N 1. – P. 288–290. <https://doi.org/10.1063/1.868838>
2. Adrian, R. J. Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer / R. J. Adrian, C. D. Meinhart, C. D. Tomkins // *J. Fluid Mech.* – 2000. – Vol. 422. – P. 1–54. <https://doi.org/10.1017/s0022112000001580>
3. Pope, S. B. *Turbulent Flows* / S. B. Pope. – Cambridge, 2000. – 771 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511840531>
4. Schumann, U. Subgrid scale model for finite difference simulations of turbulent flows in plane channels and annuli / U. Schumann // *J. Comp. Phys.* – 1975. – Vol. 18, N 4. – P. 376–404. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(75\)90093-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(75)90093-5)
5. Kim, J. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number / J. Kim, P. Moin, R. Moser // *J. Fluid Mech.* – 1987. – Vol. 177. – P. 133–166. <https://doi.org/10.1017/s0022112087000892>
6. Pan, Ch. Passive control of near-wall turbulence by means of roughness elements / Ch. Pan, J. Wang // *Procedia IUTAM*. – 2015. – Vol. 17. – P. 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2015.06.014>
7. Kreplin, H. Behavior of the three fluctuating velocity component in the wall region of a turbulent channel flow / H. Kreplin, H. Eckelmann // *Phys. Fluids*. – 1979. – Vol. 22. – P. 1233. <https://doi.org/10.1063/1.862737>

### References

1. Zhou J., Adrian R. J., Balachandar S. Autogeneration of near-wall vortical structures in channel flow. *Physics of Fluids*, 1996, vol. 8, no. 1, pp. 288–290. <https://doi.org/10.1063/1.868838>
2. Adrian R. J., Meinhart C. D., Tomkins C. D. Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, vol. 422, pp. 1–54. <https://doi.org/10.1017/s0022112000001580>
3. Pope S. B. *Turbulent Flows*. Cambridge, 2000. 771 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511840531>
4. Schumann U. Subgrid scale model for finite difference simulations of turbulent flows in plane channels and annuli. *Journal of Computational Physics*, 1975, vol. 18, no. 4, pp. 376–404. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(75\)90093-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(75)90093-5)
5. Kim J., Moin P., Moser R. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, vol. 177, pp. 133–166. <https://doi.org/10.1017/s0022112087000892>



6. Pan Ch. Passive control of near-wall turbulence by means of roughness elements. *Procedia IUTAM*, 2015, vol. 17, pp. 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2015.06.014>

7. Kreplin H., Eckelmann H. Behavior of the three fluctuating velocity component in the wall region of a turbulent channel flow. *Physics of Fluids*, 1979, vol. 22, p. 1233. <https://doi.org/10.1063/1.862737>

### Информация об авторах

*Жданов Валерий Львович* – д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [valery.zhdanov@hmti.ac.by](mailto:valery.zhdanov@hmti.ac.by).

*Иванов Дмитрий Александрович* – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [divanov@hmti.ac.by](mailto:divanov@hmti.ac.by).

*Смутьский Ярослав Иосифович* – вед. специалист. Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 1, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: [smul@ngs.ru](mailto:smul@ngs.ru).

*Терехов Виктор Иванович* – д-р техн. наук, заведующий отделом, профессор. Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 1, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: [terekhov@itp.nsc.ru](mailto:terekhov@itp.nsc.ru).

### Information about the authors

*Zhdanov Valery Lvovich* – D. Sc. (Engineering), Leading researcher. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [valery.zhdanov@hmti.ac.by](mailto:valery.zhdanov@hmti.ac.by).

*Ivanov Dmitry Alexandrovich* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior researcher. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [divanov@hmti.ac.by](mailto:divanov@hmti.ac.by).

*Smul'skii Jaroslav Iosiphovich* – Leading specialist. Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (1, Academician Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: [smul@ngs.ru](mailto:smul@ngs.ru).

*Terekhov Viktor Ivanovich* – D. Sc. (Engineering), Head of the Department, Professor. Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (1, Academician Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: [terekhov@itp.nsc.ru](mailto:terekhov@itp.nsc.ru).