

УДК 621.1.016:536.2

Л.В. Зысин, Л.П. Стешенков

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

L.V. Zyssin, L.P. Steshenkov

FEATURES OF HEAT EXCHANGE DURING FORCED CONVECTION OF MICROBIOLOGICAL FLUIDS

Обсуждаются результаты экспериментального исследования конвективного теплообмена при вынужденном течении в вертикальных трубах и плоско-параллельных каналах микробиологических сред (культуральные жидкости, нейтрализаты, гидролизаты, полиглюкины и др.). Отмечаются характерные особенности теплообмена указанных сред в ламинарной, переходной и турбулентной областях течения.

ТЕПЛООБМЕН. КОНВЕКЦИЯ. ВЫНУЖДЕННОЕ ТЕЧЕНИЕ. ЛАМИНАРНЫЙ. ТУРБУЛЕНТНЫЙ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Results of an experimental investigation of convective heat exchange during forced flow of microbiological fluids (cultural fluids, polyglucan and others) inside vertical pipes and flat-parallel channels are given and discussed. Typical features of heat exchange of such fluids for laminar, transition and turbulent parts of flow are shown.

HEAT EXCHANGE. CONVECTION. FORSE FLOW. LAMINAR. TURBULENCE. EXPERIMENTAL RESEARCH.

Современный этап развития теплофизики тесно связан с решением прикладных задач инновационных технологий. Решая на основе фундаментальных исследований практические задачи создания теоретических основ инженерных методов расчета новых видов энерготехнологического и теплоиспользующего оборудования, теплофизика постоянно обогащается за счет изучения новых сред, теплоносителей, расширения диапазонов режимных параметров и др. В последние десятилетия в мире ускоренными темпами развивается биотехнология, для которой характерна значительная доля теплоиспользующего оборудования и энергоемкость производства. Поэтому промышленное освоение процессов биосинтеза ввело в круг актуальных для теплофизики прикладных задач изучение теплообмена в биологических и микробиологических средах [1].

Микробиологическая технология базируется на закономерностях, свойственных популяциям микроорганизмов, как получаемых в промыш-

ленных условиях, так и существующих в реальных живых организмах. При этом биологическая форма движения материи с присущим ей многообразием определила ряд специфических особенностей микробиологических сред (биомасса, культуральные жидкости, продукты метаболизма клеток и др.): вариабельность и многокомпонентность, низкие концентрации и скорости реакций, переменность в ходе процесса реологических свойств, проявление у белков одновременно свойств аморфных электролитов и коллоидных растворов, а также многое другое [2].

Для создания методов расчета и оптимизации параметров технологического оборудования требуются достоверные сведения о процессах теплообмена, такие данные необходимы и для расчетов биофизических процессов внутри организмов. Построение обоснованных физических моделей соответствующих процессов невозможно без определенного набора первичной экспериментальной информации, которая позволила бы понять место рассматриваемых сред в теплофизике.

Одновременно такая информация открывает возможности выполнения необходимых инженерных расчетов. То обстоятельство, что практически все микробиологические среды являются слабо концентрированными водными растворами, дает основания предположить сходный характер процессов конвективного теплообмена с однокомпонентными средами и искать решение в данном направлении. Ниже приводятся некоторые результаты обобщения данных экспериментальных исследований теплообмена при вынужденной конвекции ряда микробиологических сред. Опыты проводились на вертикальном плоско-параллельном канале и трубах, имеющих эквивалентный диаметр 12–32 мм, длину 1000–6000 мм и снабженных предвключенным участком гидродинамической стабилизации. Предварительные опыты по определению потерь давления по длине канала и тенеграммы течения жидкости, полученные на плоско-параллельном канале, подтвердили, что протяженность l_T участка гидравлической стабилизации при числе Прандтля $Pr > 1$ была короче, чем протяженность l_T области тепловой стабилизации, что согласуется с данными многочисленных исследований. Тепловой поток создавался с помощью электрического тока. В опытах на трубе диаметром 32 мм и длиной 6000 мм тепловой поток создавался с помощью парового обогрева. Максимальная скорость исследуемых жидкостей в каналах составляла 3,5 м/с. Тестирование экспериментальных установок производилось с помощью опытов на воде, которые дали хорошую сходимость с известными зависимостями.

Исследовались следующие культуральные жидкости: дрожжевая суспензия и суспензия БВК при концентрациях C в диапазоне 2,5–20 %; отработанная культуральная жидкость (ПДБ) с концентрациями 1–15 %; остальные среды при фиксированных значениях концентрации, соответствующих технологическим условиям. Кроме того, были исследованы водные растворы полиглобулина (заменитель крови) при $C = 0,1–10$ % и глюкозы при $C = 2–25$ %. Влияние окислительно-восстановительной среды на теплообмен определялось для диапазона $pH = 1–4,5$. Тепловая нагрузка в опытах варьировалась в диапазоне $q = 50–200$ кВт/м², массовая скорость — $\rho W = 100–2500$ кг/(м²·с), температура жидкости — $t_{ж} = 20–95$ °С, давле-

ние — близкое к атмосферному. Кратко результаты опытов сводятся к следующему.

Закономерности теплообмена изучались для условий стабилизированного течения в турбулентной и переходной областях течения. Для ряда жидкостей были рассмотрены также особенности теплообмена в ламинарной области течения. Остановимся на основных результатах проведенного исследования.

Ламинарный режим течения. При обобщении экспериментальных данных по теплоотдаче на участке тепловой стабилизации при ламинарном течении и вязкостном режиме теплообмена ($Gr \cdot Pr < 250$) за основу было принято известное интерполяционное уравнение, которое для плоского канала и условий $q_x = \text{const}$ принимает вид

$$Nu \approx 1,3(Ped/l)^{1/3} (\mu/\mu_w)^m \quad (1)$$

и, как известно, с точностью ± 4 % описывает точное решение. Показатель степени m при симплексе μ/μ_w , учитывающем влияние на теплообмен переменной вязкости, для случая подъемного движения жидкости соответствует величине $m \approx 0,14$. Принятый подход позволил обобщить экспериментальные данные с точностью до коэффициента, при этом была подтверждена степенная зависимость

$$Nu \sim (Ped/l)^{1/3}. \quad (2)$$

Обобщение опытных данных по дрожжевым суспензиям позволило получить значение коэффициента пропорциональности в формуле (1) равное 2,3; для гидролизатов получено несколько иное значение, а именно 2,1. Погрешность аппроксимации в данном случае лежит в пределах +50 %. Естественно было предположить, что столь существенное расхождение связано с проявлением реологических свойств рассматриваемых сред. В обзоре Е.М. Хабахпашевой [3] отмечается, что для учета изменения вязкости неньютоновских жидкостей, обусловленного наличием радиальных температурных градиентов, обычно пользуются приближенными методами, которые представляют собой обобщения известных степенных поправок, хотя в общем случае для течения структурно-вязких жидкостей следует учитывать влияние на теплообмен не только соотношения вязкостей, но и величины $l/(Ped)$.

Основываясь на указанных положениях, мы стремились добиться удовлетворительного обобщения экспериментальных данных, ограничиваясь только уточнением степенной поправки, поскольку для исследуемых сред с помощью принятых методов измерения не удавалось определить градиенты скорости у стенки. Соответственно не мог быть вычислен коэффициент χ , учитывающий структурно-вязкие свойства. Поэтому в качестве параметра был сохранен симплекс $(\mu / \mu_w)^m$, а на его основе в результате обобщения опытных данных получена уточненная зависимость

$$Nu \approx 1,3(Ped/l)^{1/3} (\mu / \mu_w)^{0,25}, \quad (3)$$

аппроксимирующая опытные данные с погрешностью $\pm 12\%$. При этом коэффициент теплоотдачи для дрожжевых суспензий получен примерно на 15% выше, чем для ньютоновских сред при тех же значениях μ / μ_w . Сопоставление наших результатов с данными, приведенными в обзоре [3], позволяет предположить, что рассматриваемые среды следует отнести к жидкостям с линейным или квадратичным законом текучести. Окончательный ответ на данный вопрос можно получить только в результате детального изучения реологических свойств микробиологических сред, что должно стать предметом дальнейшего достаточно углубленного исследования.

Переходный режим течения. Вопросы теплоотдачи в переходной области течения для жидкостей, проявляющих неньютоновские свойства, до настоящего времени изучены мало. Отмечается [3], что наличие структурной вязкости вызывают затягивание перехода к турбулентному режиму течения. Наши экспериментальные данные также указывают на некоторое затягивание перехода, при этом был отмечен ряд закономерностей.

При фиксированном значении чисел Прандтля теплоотдача Nu характеризуется серией кривых, имеющих общую область пропорциональности числу $Re^{1,34}$. С погрешностью $\pm 10\%$ можно утверждать, что коэффициент пропорциональности является функцией числа Pr и аппроксимируется соотношением

$$\frac{Nu}{Re^{1,34}} = 1,64 \cdot 10^{-4} Pr^{1,1}. \quad (4)$$

Поскольку для обобщения был приняты только данные, соответствующие вязкостному и вязко-инерционному режимам течения, диапазон изменения μ / μ_w в опытах был невелик. Поэтому данные удалось обобщить, не вводя параметр $(\mu / \mu_w)^{0,25}$. Однако в общем случае он, очевидно, должен быть введен в формулу (4). Таким образом, формула для расчета интенсивности теплоотдачи в трубах и каналах для переходной области течения культуральных жидкостей была получена в виде

$$Nu_{пер} = 1,64 \cdot 10^4 Pr^{1,1} Re^{1,34}. \quad (5)$$

Максимальное отклонение экспериментальных данных от зависимости (5) не превышает $\pm 15\%$, что для переходной области (которая вообще характеризуется нестабильностью течения и пульсациями параметров) можно признать удовлетворительной точностью. Анализ результатов опытов показал также, что области, описываемой формулой (5), предшествует некоторая область неустойчивого теплообмена, где значения Nu выше числа Nu_∞ , определенного для ламинарной области. При этом было установлено, что для плазмолизированных дрожжевых суспензий при $Pr = 7-120$ минимальные значения чисел Nu и Re , соответствующие началу указанной выше устойчивой переходной области течения, подчиняется соответственно зависимостям

$$Nu_H^{пер} = 4,9 Pr^{0,5}; \quad (6)$$

$$Re_H^{пер} = 2 \cdot 10^3 Pr^{-0,6}. \quad (7)$$

Интересно, что при $Pr = 0,72$ (воздух) формула (6) дает хорошо известное теоретическое решение $Nu_\infty \approx 4,36$, а формула (7) — также хорошо опробованное значение $Re_{кр} \approx 2300$.

Отмеченная выше зависимость потери устойчивости от числа Прандтля согласуется с данными А.А. Жукаускаса и А.А. Шлянчаускаса [4], которые справедливо отмечают, что такой характер зависимостей можно объяснить тем, что при больших значениях числа Прандтля тепловой пограничный слой значительно утоняется по сравнению с динамическим. В результате имеющие место в пристенной области малые возмущения начинают играть относительно большую роль в процессе перехода и ускоряют его начало.

Турбулентный режим течения. Как уже отмечалось, основная часть наших исследований относилась к турбулентной области течения как

наиболее типичной для технологического оборудования. Опытные данные по теплоотдаче при турбулентном течении капельных жидкостей (и газов) в трубах и каналах, как известно, хорошо аппроксимируются соотношением

$$Nu = A Re^{0,8} Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (8)$$

При этом известно, что в зависимости от направления теплового потока, числа Pr , условий эксперимента и т. п. получаемые в экспериментах значения A и n в этой формуле колеблются в следующих пределах: $A = 0,021-0,026$; $n = 0,3-0,6$. Тестовые опыты, проведенные нами на воде, с погрешностью $\pm 10\%$ подтвердили классические значения: $A = 0,023$; $n = 0,4$. Поэтому при обработке и анализе результатов последующих опытов на других жидкостях искалась зависимость вида

$$Nu = k 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (9)$$

где k — коэффициент, учитывающий индивидуальные свойства жидкости.

Резюмируя результаты проведенных исследований, отметим, что они подтвердили возможность пользоваться указанным подходом в целом ряде случаев, однако не для всех исследованных жидкостей.

Так для культуральных жидкостей типа ПДБ с погрешностью $\pm 15\%$ опытные данные обобщаются с помощью зависимости (9) при $k = 1$. Для дрожжевых суспензий с аналогичной погрешностью получено значение $k = 1,216$. В ряде работ указывается [3], что расчеты коэффициентов теплообмена для нелинейно-вязких жидкостей можно производить по формулам для ньютоновских жидкостей, если вычислять значения чисел Re и Pr по величине вязкости на стенке. Такая обработка была произведена нами для дрожжевых суспензий. Погрешность аппроксимации при этом увеличилась до $\pm 25\%$, поэтому в дальнейшем от подобной обработки пришлось отказаться.

Самостоятельную группу составили гидролизаты и нейтрализаты: их теплоотдача подчиняется одинаковым закономерностям, которые при этом отличаются от общеизвестных. В частности, теплоотдача указанных сред в турбулентной области течения оказалась пропор-

циональной $Re^{0,47}$, что исключало возможность применения для обобщения зависимости (9). Кроме того, была установлена некоторая зависимость теплоотдачи от pH (диапазон изменения $pH = 1-4,5$). Иная зависимость теплоотдачи от числа Re обусловила существование для данных сред области ($Re \approx 7 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$), где их теплоотдача выше, чем для воды, и области ($Re > 3,5 \cdot 10^4$), в которой их теплоотдача ниже, чем для воды (рис. 1). Становятся объяснимыми противоречивые данные относительно соотношения теплоотдачи воды и гидролизатов, встречающиеся в ряде нормативных документов.

Визуальные исследования показали, что для гидролизатов и нейтрализатов при переходе к турбулентному режиму течения характерно помутнение — они перестают быть прозрачными. Мы высказали предположение, что данное обстоятельство связано с образованием пенно-эмульсионной структуры. В этом случае теплоотдача действительно может несколько увеличиваться, благодаря интенсификации массообменных процессов в момент образования пены. То обстоятельство, что при дальнейшем увеличении числа Re темп увеличения теплоотдачи примерно такой же, как в ламинарной области течения, позволяет предположить, что пенно-эмульсионная структура при общей интенсификации теплообмена определяет условия течения в пристенной области, близкие к ламинарному.

Здесь необходимо отметить, что параметр pH определяет молекулярное взаимодействие на границе раздела фаз растворов, содержащих поверхностно-активные вещества, и тем самым характеризует устойчивость пенных структур. В такой постановке становится понятным влияние pH на теплообмен. Однако отмеченные особенности могут быть связаны также с изменением физических свойств жидкостей и структурной вязкостью эмульсий, а влияние pH при этом будет иметь косвенный характер.

Окончательный ответ может быть получен только на основе детальных исследований локальных характеристик потока и структуры течения. Поэтому на данном этапе мы вынуждены ограничиться обобщением результатов опытов в виде формулы

$$Nu = 0,91 Re^{0,47} (pH)^{-0,16} \quad (10)$$

которая аппроксимирует опытные данные с погрешностью, не превышающей $\pm 20\%$, в области $7 \cdot 10^3 < Re < 10^6$, $1 < pH < 4,5$.

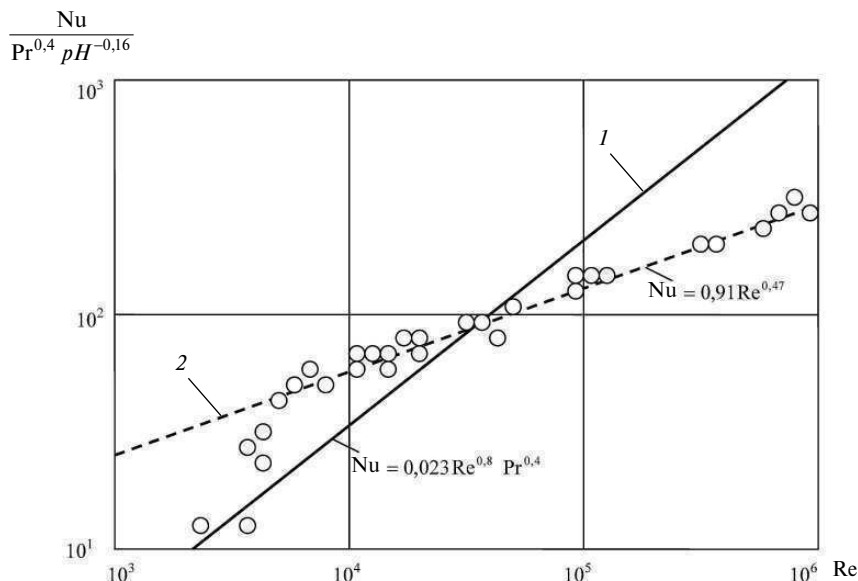


Рис. 1. Сопоставление теплоотдачи воды (1) и гидролизатов (2) в турбулентной области течения

Отдельную группу среди исследованных сред составили *полиглюкины*, где обнаружена аномалия теплоотдачи при малых концентрациях и затягивание перехода к развитому турбулентному течению. Последнее обстоятельство, по-видимому, связано с влиянием полимерных свойств жидкости. Из ряда работ, например [5], известно, что эффект Томса проявляется в жидкостях с малыми полимерными добавками обычно при турбулентном течении.

Интенсивность теплообмена для водных растворов полиглюкина (при одинаковых числах Re) ниже, чем для воды. На рис. 2 приведена экспериментально полученная зависимость изменения коэффициента K (см. формулу (9)) от процентной весовой концентрации абсолютно сухих веществ (а.с.в.). Как видно из приведенного графика в области малых концентраций ($C = 0,1-0,5\%$) наблюдается резкое снижение теплоотдачи. С увеличением концентрации до $C \approx 1\%$ теплоотдача несколько возрастает, далее опять снижается, стабилизируясь при $C \approx 3\%$.

Приведенные данные позволяют сравнить слабые водные растворы полиглюкина и жидкости с высокополимерными добавками, где, как известно, было обнаружено существование оптимальных малых концентраций, при которых снижается сопротивление [3]. Опыты Е.М. Ха-

бахпашевой и Б.В. Перепелицы [6] показали, что основное действие полимерных добавок проявляется в снижении интенсивности поперечных компонент пульсации скорости. Поскольку указанные пульсации вместе с пульсациями температуры определяют интенсивность теплообмена между потоком и стенкой, естественно ожидать уменьшения теплоотдачи.

Для сравнения были проведены опыты с водными растворами глюкозы и глицерина, которые носили в известной степени методический характер. Отмечено, что, как и у полиглюкина, интенсивность теплоотдачи для указанных растворов с увеличением концентрации снижается, но не столь интенсивно.

Из-за отсутствия достаточного объема данных о теплофизических свойствах для полиглюкина и ему подобных сред при вычислении критериев подобия использовались значения физических констант для воды. Поэтому наряду с критериальной была произведена обработка опытных данных в размерном виде, что позволило получить зависимость

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \exp(-BC), \quad (11)$$

где α_0 — теплоотдача для дистиллированной воды; B — коэффициент, зависящий от рода жидкости; C — весовая концентрация абсолют-

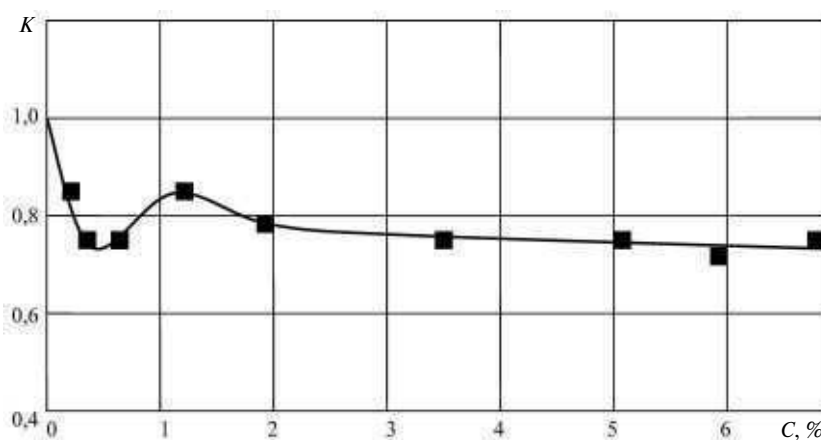


Рис. 2. Зависимость коэффициента k в формуле (9) от концентрации а.с.в. для полиглюкина

но сухих веществ, %. Получили: $B = 3,35$ для водных растворов полиглюкина в области $C = 1,3–10$ %; $B = 0,97$ для водных растворов глюкозы при $C = 2–25$ %; $B = 1,22$ для водных растворов глицерина при $C = 5–40$ %.

Изложенные результаты исследования теплообмена микробиологических сред позволили выявить ряд специфических особенностей, отличающих указанные среды от однокомпонентных жидкостей. В ламинарной области течения эти особенности проявляются незначительно и сводятся к увеличению области тепловой стабилизации на входном участке канала и затягиванию начала переходной об-

ласти течения. Переходная область носит более размытый характер и заканчивается при больших значениях критерия Re . Наибольшие отличия наблюдались в области турбулентного течения. Здесь для ряда микробиологических сред отмечена аномалия теплоотдачи при малых концентрациях, слабая зависимость теплоотдачи от числа Re , переход к турбулентному режиму при больших значениях Re и др. Ряд отмеченных особенностей находит объяснение на основе современных представлений о реологических средах, а также о влиянии окислительно-восстановительного потенциала на пенообразование жидкостей. Некоторые особенности пока ждут своего объяснения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зысин, Л.В.** Проблемы теплообмена при разработке оборудования микробиологических производств [Текст] / Л.В. Зысин // Тезисы докладов УП-й Всесоюзной конф. «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах». Т. 3.— Л., 1985.
2. **Кутателадзе, С.С.** Теплоотдача и гидродинамическое сопротивление [Текст]: Справочное пособие / С.С. Кутателадзе.— М.: Энергоатомиздат, 1990.— 367 с.
3. **Хабакпашева, Е.М.** Конвективный теплообмен в реологических средах [Текст] / Е.М. Хабакпашева.— В сб.: Реодинамика и теплообмен / Ин-т теплофизики СО АН СССР.— Новосибирск, 1979.— С. 5–46.
4. **Žukauskas, A.** Convective Heat Transfer in Cross Flow [Text]: Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer.— New York: Wiley & Sons, 1987.
5. **Седов, Л.И.** Особенности структуры пристенной турбулентности и механизм снижения трения полимерными добавками [Текст] / Л.И. Седов, В.А. Иосилевич, В.Н. Пилипенко.— В кн.: Турбулентные двухфазные течения и техника эксперимента / АН ЭССР.— Таллин, 1985.— С. 7–12.
6. **Kutateladze, S.** Experimental investigation of the structure of near-wall turbulence and viscous sublayer [Text] / S. Kutateladze, E. Khabakhpasheva, V. Orlov, V. Perepelitsa, E. Mikhailova // In: Turbulent Shera Flows VI.— Berlin-Heidelberg-New York: Sprinderverlag, 1979.— P. 91–103.

REFERENCES

1. **Zysin L.V.** Problemy teploobmena pri razrabotke oborudovaniia mikrobiologicheskikh proizvodstv [Tekst] / Tezisy dokladov YII-oi Vsesoiuznoi konf. «Dvukhfaznyi potok v energeticheskikh mashinakh i apparatakh». T. 3.— L., 1985. (rus.)
2. **Kutateladze S.S.** Teplootdacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie: Spravochnoe posobie [Tekst].— M.: Energoatomizdat, 1990.— 367 s. (rus.)
3. **Khabakhpasheva E.M.** Konvektivnyi teploobmen v reologicheskikh sredakh [Tekst] // V sb.: Reodinamika i teploobmen / In-t teplofiziki SO AN SSSR.— Novosibirsk, 1979.— S. 5–46.
4. **Žukauskas, A.** Convective Heat Transfer in Cross Flow [Text]: Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer.— Wiley & Sons, New York, 1987.
5. **Sedov L.I., Iosilevich V.A., Pilipenko V.N.** Osobennosti struktury pristennoi turbulentnosti i mekhanizm snizheniia treniia polimernymi dobavkami [Tekst].— V kn.: Turbulentnye dvukhfaznye techeniia i tekhnika eksperimenta / AN ESSR.— Tallin, 1985.— S. 7–12.
6. **Kutateladze S., Khabakhpasheva E., Orlov V., Perepelitsa V., Mikhailova E.** Experimental investigation of the structure of near-wall turbulence and viscous sublayer [Text].— In: Turbulent Shear Flows VI.— Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag. 1979.— P. 91–103.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗЫСИН Леонид Владимирович — доктор технических наук научный сотрудник отделения энергодинамики Института интегративных исследований; 34600, ул. Геула, 39, г. Хайфа, Израиль, e-mail: lv_zyssin@mail.ru

СТЕШЕНКОВ Леонид Петрович — кандидат технических наук профессор кафедры атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail:steshenkov@spbstu.ru

AUTHORS

ZYSSIN Leonid V. — Integrative Research Institute (IRI), Department of Entrgodynamics; 34600, Geula 39, Haifa, Israel; e-mail: lv_zyssin@mail.ru

STESHENKOV Leonid P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail:steshenkov@spbstu.ru