

DOI 10.5862/JEST.231.3

УДК 536.24: 634.0.863.021

*Л.В. Зысин, Л.П. Стешенков*

## **ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОЭТАНОЛА**

*L.V. Zyssin, L.P. Steshenkov*

### **THE PROBLEMS OF THERMOPHYSICALLY IMPROVING BIOETHANOL PRODUCTION**

Рассматриваются специфические особенности некоторых рабочих сред промышленной биотехнологии как объектов теплофизического исследования. Приводятся обобщенные данные экспериментальных исследований теплопроводности, теплоемкости, вязкости для гидролизатов, нейтрализатов, культуральной жидкости – основных жидкостных потоков производства биоэтанола. ТЕПЛОФИЗИКА; БИОТЕХНОЛОГИЯ; БИОЭТАНОЛ; ГИДРОЛИЗАТ; НЕЙТРАЛИЗАТ; ВЯЗКОСТЬ; ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ; ТЕПЛОЁМКОСТЬ; ЭКСПЕРИМЕНТ; ОБОБЩЕНИЕ.

The article discusses the specific features of some operating environments of industrial biotechnology as objects of thermophysical studies. We have summarized the experimental studies on thermal conductivity, heat capacity, and viscosity for hydrolysates, neutralizers, and culture liquids that make up the - core liquid flows in bioethanol production.

THERMOPHYSICS, BIOTECHNOLOGY, ETHANOL FUEL, HYDROLYSATE, NEUTRALIZER, VISCOSITY, THERMAL CONDUCTIVITY, HEAT CAPACITY, EXPERIMENT, GENERALIZATION.

#### **Постановка задачи исследования**

Биоэтанол, или топливный спирт, – обычный этанол, получаемый в процессе переработки растительного сырья методами биотехнологии. Он широко используется в смеси с моторным топливом (или в чистом виде) в Бразилии и США. В последнее время интерес к нему проявили Италия, Литва и некоторые другие европейские страны [1–3]. Существует ошибочное мнение об отрицательном энергетическом балансе производства этанола. В действительности энергетические затраты, связанные с его производством (включая сбор и доставку сырья), на лучших заводах США примерно в два раза ниже энергетической эффективности производимого биотоплива. Другое дело, что отечественные гидролизные заводы, аппаратурное оформление которых сложилось в тридцатые годы прошлого века, отличаются крайне низкой тепловой эффективностью. Так, среднеотраслевой расход тепловой энергии на производство гидролизно-

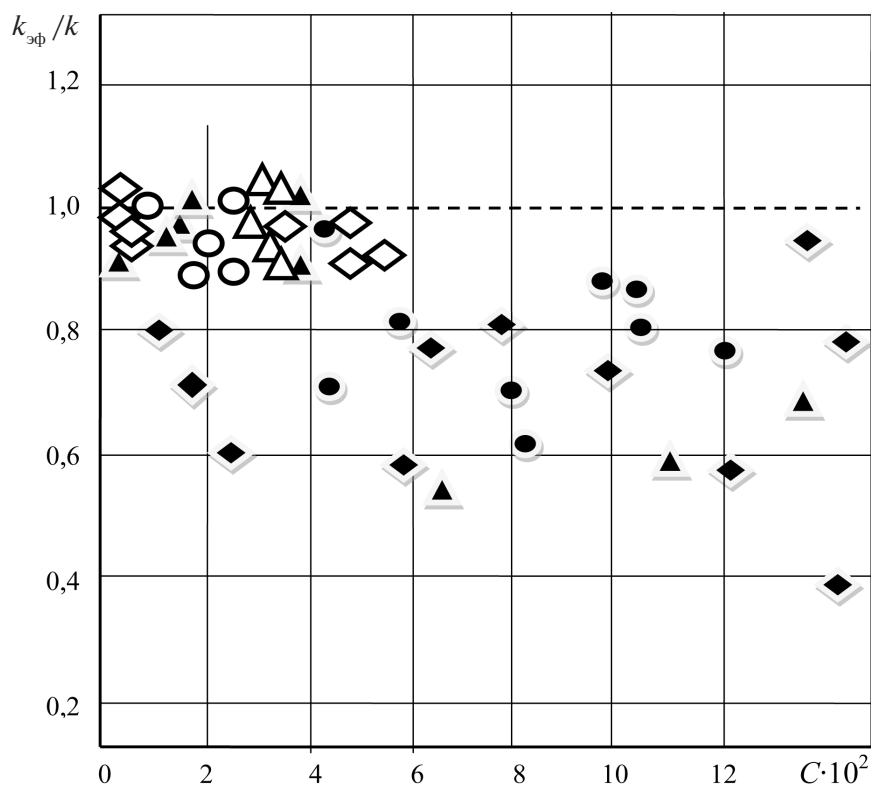
го спирта (по данным 1985 года) составлял 114 ГДж/т, что примерно в 4 раза больше тепловой эффективности получаемого биоэтанола.

Вопросы определяющего влияния теплогидравлических процессов на тепловую эффективность данной технологии и необходимость их изучения поднимались в технической литературе неоднократно [4, 5]. Однако длительное время основное внимание исследователей уделялось совершенствованию технологических процессов перколяционного гидролиза [6, 7]. Из теплофизических процессов изучались только термодинамика растворов, связанная с ректификацией спирта [8], а среди процессов, определяющих уровень теплоснабжения, систематически изучались лишь процессы сушки и сжигания отходов.

В результате сложилась практика проектирования, когда теплогидравлические процессы, играющие решающую роль в тепловой экономичности производства, рассматривались с ис-

пользованием зависимостей, полученных для воды, а теплофизические особенности субстратов биологических производств не учитывались. Сложилось представление, что погрешности теплового расчета могут быть компенсированы путем установки дополнительных теплообменников. Такой подход вел к повышению капитальных и эксплуатационных затрат (на некоторых предприятиях было шестикратное завышение конвективных поверхностей). Кроме того, принятый подход вел к нарушению оптимального теплового баланса в системе теплоиспользования и, как следствие, к росту термодинамической необратимости в целом. Отсюда непосредственно вытекает наблюдаемое существенное увеличение энергетических затрат.

Обследование ряда отечественных гидролизных производств, результаты которого представлены на рисунке, наглядно показало, к каким ошибкам может привести традиционный подход. На рисунке приведены экспериментальные данные об отношении коэффициента теплопередачи  $k_{эф}$  к  $k$ . Данные относятся к различным теплоиспользующим узлам и различным субстратам. В качестве переменного параметра на рисунке принята концентрация (весовая доля) абсолютно сухих веществ (асв) в растворе, обозначенная как  $C$ . Опыты проводились после промывки теплообменников, что позволяло исключить влияние дополнительного термического сопротивления на теплообмен. Отдельные точки на рисунке соответствуют теплообменникам од-



**Достоверность расчетов теплопередач в теплообменном оборудовании отечественных гидролизных заводов:**

- |   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| ◆ | – греющие камеры<br>выпарных установок; | △ | – охладители нейтрализата;                                  |
| ● | – дрожжевые теплообменники;             | ◇ | – конденсаторы фурфурол<br>содержащего пара;                |
| ▲ | – охладители барды, лютера,<br>сусла;   | ○ | – теплообменники<br>отработанной культуральной<br>жидкости; |

ного типа, но для различных схем включения, технологических стадий и биохимических условий производства. Значение  $k_{эф}/k$  для каждой точки получено путем осреднения результатов 3–5 опытов на различных производствах. Промышленные условия эксплуатации позволяли определять только средние значения коэффициентов теплопередачи. В результате не было возможности детализировать отдельные теплообменные процессы. Полученные результаты имеют в известной мере качественный характер, но они показывают, что в ряде случаев эффективный уровень теплопередачи почти в два раза ниже принятого при проектировании.

С учетом изложенного в настоящей работе предпринята попытка анализа характерных субстратов производства биоэтанола как самостоятельного объекта теплофизического исследования, подходов к обобщению опытных данных по их конвективному теплообмену и теплофизическим свойствам.

#### Субстраты биотехнологии как объекты теплофизического исследования

Особенностью микробиологических технологий по сравнению с другими промышленными производствами является использование, наряду с обычными, такой специфической формы движения матери, как биологическая. Присутствие биологического начала делает процесс культивирования ключевой стадией технологического процесса [9]. Но в промышленном производстве, наряду с этой стадией, осуществляется целый ряд сопутствующих процессов, в не меньшей степени определяющих эффективность технологии. Среди таких стадий, сопровождающихся интенсивными теплообменными процессами, можно назвать подготовку субстратов (питательных), очистку, выделение, концентрирование продукта и др. Все жидкости, перерабатываемые на этих стадиях, с полным основанием можно отнести к микробиологическим средам.

Состав, классификация, общие и индивидуальные биохимические свойства различных микробиологических сред рассматриваются в обширной специальной литературе, например [6, 7, 9]. Исходя из этих публикаций можно отметить ряд специфических особенностей, которые должны учитываться при теплотехнических расчетах и исследованиях:

1. Наличие биологически действующего начала предопределяет значительно большую по сравнению с химико-технологическими процессами вариабельность: в ходе биосинтеза образуется ряд промежуточных неидентифицированных продуктов, т.е. веществ с неизвестными составом и свойствами. В некоторых случаях это исключает возможность использовать в исследованиях модельные жидкости и требует вести исследование на средах, полученных в промышленных условиях.

2. Большинство микробиологических сред имеют водную основу, содержащую многокомпонентные группы сложных органических и минеральных веществ, которые могут образовывать истинные растворы, находиться в коллоидном состоянии или в виде суспензий. Некоторые среды имеют непостоянный состав. Теплофизические и термодинамические свойства этих сред мало изучены.

3. Ряд биополимеров в микробиологических средах (белки, углеводы, липиды, ферменты, витамины, гормоны) образуют макромолекулы, молекулярная масса которых меняется в широких пределах [9]. Например, молекула  $\beta$ -лактоглобина имеет формулу  $C_{1864}H_{5012}N_{465}S_{21}$ , а за счет межмолекулярных связей размеры молекул могут быть еще больше.

4. В то же время целые классы веществ (аминокислоты, жирные кислоты, продукты обмена веществ и др.) имеют молекулярную массу ниже 1000. Молекулам многих из них свойственна конформация, обусловленная биологической активностью. В зависимости от химического состава среды и температуры молекулы белков подвержены денатурации, при которой за счет разрыва нековалентных внутримолекулярных контактов форма молекулы меняется – спираль расплетается. Указанные явления могут приводить к переменным реологическим свойствам.

5. Специфической особенностью белков является наличие одновременно коллоидных и амфотерных свойств. В присутствии щелочей они ведут себя как кислоты, а в присутствии кислот – как основания. Отсюда следует, что ход биохимических процессов в значительной степени связан с окислительно-восстановительным потенциалом окружающей среды ( $pH$ ).

6. Биохимические процессы осуществляются в относительно узком диапазоне температур и сопровождаются выделением тепловой энергии.

7. Скорость биохимических реакций существенно ниже, чем в органической химии, что позволяет предположить их несущественное влияние на процессы конвективного теплообмена.

8. Вопросы моделирования в микробиологических средах, в том числе моделирования их теплофизических и термодинамических свойств, пока только ставятся [9]; одновременно отмечается своеобразный характер модельных и масштабных переходов в них.

На основании изложенного можно заключить, что в ближайшее время трудно ожидать появления адекватных аналитических моделей тепловых и термодинамических процессов в оборудовании микробиологических производств. Поэтому в изучении таких процессов долгое время будет преобладать теплофизический эксперимент, максимально приближенный к условиям промышленной технологии, на средах, полученных из промышленного сырья и материалов.

Следует отметить, что применительно к проблемам медицины исследования теплогидравлических процессов ведутся уже несколько десятилетий. Например, изучение реологических свойств крови стало одним из источников успеха соответствующей области медицины,

#### Подходы к обобщению данных по теплообмену субстратов

Не вдаваясь в недостаточно изученные процессы энергетического взаимодействия в биологических системах, кинетику и термодинамику биологических процессов, из самых общих соображений на основании изложенных выше данных можно предположить, что суммарные характеристики конвективного теплообмена микробиологических сред, наряду с общепринятыми зависимостями гидродинамического и теплового подобия, будут определяться следующими параметрами:

концентрациями взвешенных ( $C_{вз}$ ) и растворенных ( $C_{рас}$ ) веществ, обуславливающими природу макро- и микромолекулярных взаимодействий в разбавленных растворах [9];

характеристикой окислительно-восстановительного потенциала среды ( $pH$ );

температурой как характеристикой денатурации, разложения и ряда других особенностей белковой среды.

В отдельных случаях можно предположить также влияние временной характеристики  $\tau$ .

Возможность (в некоторых случаях) на основе такого упрощенного подхода обобщить экспериментальные данные по теплообмену для ряда микробиологических сред продемонстрирована в работах [10, 11].

Так, например, для сред, не подчиняющихся известным зависимостям по кипению, обобщение опытных данных достигнуто введением переменного эмпирического коэффициента  $K_c = f(C)$ . Для исследованного диапазона режимных параметров при кипении дрожжевых суспензий была использована аппроксимация

$$K_c = \exp b(\ln C), \quad (1)$$

где  $C$  – весовая концентрация абсолютно сухих веществ в растворе.

В результате удалось получить ряд формул, пригодных для инженерных расчетов. В частности, для определения коэффициента теплоотдачи при развитом кипении культуральной жидкости (дрожжевая суспензия) конкретная формула приняла вид [11]

$$\alpha_{00} = \left( \frac{\lambda^2}{\nu \sigma T} \right)^{1/3} q^{2/3} \exp 0,187 \left( 47,3 + \frac{1}{\ln C} \right), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2)$$

Здесь  $\lambda$  – теплопроводность;  $\nu$  – динамическая вязкость;  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $T$  – температура.

Обобщить экспериментальные данные по конвективному теплообмену при вынужденном течении ряда гидролизных субстратов удалось с помощью введения параметра  $pH$  [10]. Так, например, для турбулентного режима течения гидролизата получена формула

$$\text{Nu} = 0,91 \text{Re}^{0,47} (pH)^{-0,16}, \quad (3)$$

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

Здесь необходимо отметить, что подобные подходы не позволяют строить физические модели процесса. В частности, можно ожидать, 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 его влияние  $pH$  на теплообмен. Однако можно также связать отмеченные отклонения с из-

менением физических свойств жидкостей и структурной вязкостью эмульсий; влияние  $pH$  при этом будет иметь косвенный характер. Окончательный ответ может быть получен только на основе детальных исследований локальных характеристик потока и структуры течения.

### Теплофизические свойства некоторых субстратов

Применение зависимостей, подобных формулам (2) или (3), требует задания соответствующих теплофизических констант. Поэтому изучение закономерностей теплообмена должно сочетаться с определением теплофизических свойств, в рассматриваемом случае – плотности, вязкости, теплоемкости, теплопроводности, поверхностного натяжения. Для исследуемых сред малоприменимы методы обобщенной проводимости, основанные на характеристиках чистых веществ, и другие методы. Здесь, как и при изучении теплообмена, требуются экспериментальные исследования на реальных промышленных средах. Поэтому изучение теплофизических свойств микробиологических сред становится еще одним самостоятельным направлением теплофизического исследования в данной области.

В научной литературе можно найти сведения о теплофизических свойствах некоторых сред гидролизно-дрожжевых производств [7, 12, 13]. Однако эти данные – разрозненные и неполные. Для подтверждения их адекватности и расширения объема имеющейся информации во Всесоюзном институте гидролиза растительных материалов (ВНИИ гидролиз) были проведены специальные исследования на промышленных

средах. В ходе этих опытов исследовались: гидролизаты, нейтрализаты, культуральные жидкости (дрожжевые суспензии) и отработанная дрожжевая суспензия (последрожжевая бражка). Определялись их следующие теплофизические свойства: кинематическая вязкость  $\mu$ , динамическая вязкость  $\nu$ , плотность  $\rho$ , теплопроводность  $\lambda$  и теплоемкость  $c_p$ . Опыты проводились сотрудниками института И.Я. Мароне, Б.С. Гутковским при участии Э.А. Козловой. Методики исследования были стандартные: вязкость определялась электровискозиметром ЭВИ-56ПЛ, теплоемкость – методом калориметрирования, теплопроводность – по методу цилиндрического слоя, плотность – пикнометрами. К обобщению были также привлечены обширные данные, полученные в Институте лесохимической промышленности (ЦНИЛХИ) В.В. Заводчиковой. Для тестирования экспериментальной информации привлекались результаты, приведенные в работе [14].

В табл. 1, 2, 3 и 4 приведены результаты обобщения всей собранной информации о теплофизических свойствах микробиологических сред, использованной для анализа. Максимальная погрешность при аппроксимации опытных данных формулами, приведенными в указанных таблицах, не превышает величины 4,8 %, что позволяет сделать вывод о возможности использования полученных эмпирических формул в инженерных расчетах.

Следует отметить, что пока в силу определенных методических трудностей не для всех упомянутых сред удалось определить физические константы в объемах, достаточных для обобщения (в частности, коэффициент поверхностного натяжения).

Таблица 1

Эмпирические формулы для расчета теплофизических свойств нейтрализата

Параметр	Формула или величина	Область применения	Источник
$\lambda$ , Вт/м·К	0,601	$T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,06$	Опыты В.В. Заводчиковой
$c_p$ , Дж/кг·К	3,99	$T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,06$	Опыты В.В. Заводчиковой
$10^6 \cdot \nu$ , м <sup>2</sup> /с	$1,79 - T \exp(7 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,019 T - 2,9) + C \exp(1,03 C^2 - 1,95 C + 8,35)$	$T = 20 - 80\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,06 - 0,20$	[13] и опыты В.В. Заводчиковой
$10^6 \cdot \mu$ , Па·с	$1,788 - T \exp(7 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,019 T - 2,9) + C \exp(-1,85 C^2 - 2,57 C + 10,5)$	$T = 60 - 80\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,03 - 0,30$	[13]
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$1000 + 440 C - 0,33 T$	$T = 20 - 80\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,04 - 0,21$	[13]



Таблица 2

**Эмпирические формулы для расчета теплофизических свойств гидролизата**

Параметр	Формула или величина	Область применения	Источник
$\lambda$ , Вт/м·К	0,584	$T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,06$	Опыты В.В. Заводчиковой
$c_p$ , Дж/кг·К	3,89	$T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,06$	Опыты В.В. Заводчиковой
$10^6 \cdot \nu$ , м <sup>2</sup> /с	$1,789 - T \exp(7 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,019 T - 2,9) + C \exp(1,03 C^2 - 1,95 C + 8,35)$	$T = 20-100\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,009-0,06$	Опыты В.В. Заводчиковой
$10^6 \cdot \mu$ , Па·с	$1,788 - T \exp(7 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,019 T - 4,022) + C \exp(1,03 C^2 - 1,95 C + 8,35)$	$T = 20-100\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,015-0,03$	[13]
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$1000 + 1600 - 0,33 T$	$T = 20-100\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,009-0,06$	[7] и опыты В.В. Заводчиковой

Таблица 3

**Эмпирические формулы для расчета теплофизических свойств культуральной жидкости (дрожжевой суспензии)**

Параметр	Формула или величина	Область применения	Источник
$\lambda$ , Вт/м·К	$0,023 - 0,23 C + \ln(-10^{-4} \cdot 0,121 T^2 + 10 - 2 \cdot 0,25 T + 1,6)$	$T = 30-90\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,01-0,20$	Опыты В.В. Заводчиковой и И.Я. Мароне
$c_p$ , Дж/кг·К	3,32	$T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,20$	Опыты В.В. Заводчиковой
$10^6 \cdot \nu$ , м <sup>2</sup> /с	$1,789 - T \exp(7 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,019 T - 2,9) + C \exp(18,6 C^2 + 2)$	$T = 40-80\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,05-0,20$	Опыты И.Я. Мароне
$10^6 \cdot \mu$ , Па·с	$1,79 - T \exp(7 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,019 T - 4,02) + C \exp(-8,2 C^2 - 41,5 C + 4,9)$	$T = 30-90\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,10-0,20$	Опыты И.Я. Мароне
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$1000 + 340 - 0,33 T$	$T = 30-80\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,10-0,20$	[12]

Таблица 4

**Эмпирические формулы для расчета теплофизических свойств отработанной культуральной жидкости**

Параметр	Формула или величина	Область применения	Источник
$10^6 \cdot \nu$ , м <sup>2</sup> /с	$1,79 - T \exp(7 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,019 T - 2,922) + C \exp(17 C^2 - 4,4 C + 1,57)$	$T = 40-90\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,10-0,20$	Опыты И.Я. Мароне
$10^6 \cdot \mu$ , Па·с	$1,788 - T \exp(7 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,019 T - 4,022) + C \exp(22 C^2 - 19 C + 8,0)$	$T = 40-90\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,10-0,20$	Опыты И.Я. Мароне
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$1000 + 520 - 0,33 T$	$T = 20-40\text{ }^\circ\text{C}$ $C = 0,10-0,30$	Опыты И.Я. Мароне

**Выводы**

Учет при проектировании биотехнологических производств реальных теплогидравлических процессов позволяет снизить энергетиче-

ские затраты и ресурсоемкость в производстве биоэтанола – перспективного энергетического ресурса, получаемого из возобновляемого (растительного) сырья.

Особенность биотехнологии по сравнению с другими промышленными производствами заключается в использовании, наряду с обычными формами движения материи, биологической формы. Как следствие, среды биотехнологии образуют специальную группу теплоносителей, требующую особых подходов при проведении экспериментов и обобщении опытных данных.

Для ряда субстратов опытные данные по теплообмену удается обобщить введением параме-

тров, зависящих от концентраций взвешенных  $C_{вз}$  или растворенных  $C_{рас}$  веществ, а также от характеристики окислительно-восстановительного потенциала среды ( $pH$ ). Такой подход позволяет получить формулы, пригодные для инженерных расчетов, однако не дает нужной информации для построения адекватных физических моделей. Для создания таких моделей потребуются дальнейшие совместные теплофизические и биохимические исследования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов С.А. Современное состояние и тенденции развития мирового рынка производства биоэтанола // Нефтепереработка и нефтехимия. 2010. №5. С. 6–17.
2. U.S. Ethanol Industry Production Capacity Outlook // California Energy Commission. STAFF REPORT. 2005. 11 pp.
3. Urbanchuk John M. Consumer Impacts of the Renewable Fuel Standard // LECG, LLC. May 2003. 16 pp.
4. Ефимов В.М. Недостатки тепловой схемы гидролизных заводов и пути их устранения // Гидролизная промышленность СССР. 1953. №2. С. 15–17.
5. Зысин Л.В. Проблемы теплообмена при разработке оборудования микробиологических производств // Тезисы докладов VII-й Всесоюзной конф. «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах». Т.3. Л.: 1985. С. 19–21.
6. Бирюков В.В., Кантерс В. М. Оптимизация периодических процессов микробиологического синтеза. М.: Наука, 1985. 238 с.
7. Корольков И.И. Перколяционный гидролиз растительного сырья. М.: Лесная промышленность, 1991. 262 с.
8. Цирлин Ю.А. Ректификация фурфурола. М.: Лесная промышленность, 1991. 190 с.
9. Биохимическая термодинамика: пер. с англ. / Под ред. М. Джоунс. М.: Мир, 1982. 440 с.
10. Зысин Л.В., Стешенков Л. П. Особенности теплообмена при вынужденной конвекции микробиологических сред // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2013. №4(183). С. 320–326.
11. Зысин Л.В., Стешенков Л.П. Обобщенные результаты экспериментальных исследований теплообмена при развитом пузырьковом кипении ряда микробиологических сред и модельных жидкостей // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2015. №1(214). С. 71–78.
12. Вайнер А.С., Куплёнова Н. С. Некоторые физические константы дрожжевой суспензии // Гидролизная и лесохимическая промышленность. 1968. №4. С. 14.
13. Гутковский Б.С. Исследование работы установок по упариванию последрожжевой бражки // Сб. тр. ВНИИ гидролиз. Л., 1978. Вып. 28. С. 87–97.
14. Wakao Noriaki. Современные теплоносители в химической технологии // Кагаку кодзё (Chem. Factory). 1975. Vol. 19, № 1. P. 10–41 (япон.)

### REFERENCES

1. Karpov S.A. Sovremennoye sostoyaniye i tendentsii razvitiya mirovogo rynka proizvodstva bioetanol [Current status and development trends of the world market for bioethanol production]. *Neftepererabotka i neftekhimiya*. 2010. № 5. S. 6–17. (rus.)
2. U.S. Ethanol Industry Production Capacity Outlook. *California Energy Commission. STAFF REPORT*, 2005. 11 rr.
3. Urbanchuk John M. Consumer Impacts of the Renewable Fuel Standard. LECG, LLC. May 2003. 16 pp.
4. Yefimov V.M. Nedostatki teplovoy skhemy gidroliznykh zavodov i puti ikh ustraneniya [Disadvantages of the thermal scheme of the hydrolysis of plants and their remedies]. *Gidroliznaya promyshlennost SSSR*. 1953. №2. S. 15–17.
5. Zysin L.V., Steshenkov L.P. Problemy teploobmena pri razrabotke oborudovaniya mikrobiologicheskikh proizvodstv [Problems of heat transfer in equipment development of microbiological production]. *Tezisy dokladov VII-oy Vsesoyuznoy konf. «Dvukhfaznyy potok v energeticheskikh mashinakh i apparatakh»*. T. 3. L. 1985. S. 19–21.
6. Biryukov V.V., Kanters V.M. Optimizatsiya periodicheskikh protsessov mikrobiologicheskogo sinteza [Optimization of periodic processes of microbiological synthesis]. М.: Nauka, 1985. 238 s. (rus.)
7. Korolkov I.I. Perkolyatsionnyy gidroliz rastitelnogo syrya [Percolation hydrolysis of plant materials]. М.: Lesnaya promyshlennost, 1991. 262 s. (rus.)

8. **Tsirlin Yu.A.** Rektifikatsiya furfurola [Rectification of furfural]. M.: Lesnaya promyshlennost, 1991. 190 s. (rus.)

9. Biokhimicheskaya termodinamika: per. s angl. [Biochemical thermodynamics] / M. Dzhouns. M.: Mir, 1882. 440 s. (rus.)

10. **Zysin L.V., Steshenkov L.P.** Osobennosti teploobmena pri vynuzhdennoy konveksii mikrobiologicheskikh sred [Features of heat exchange during forced convection of microbiological fluids]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU*. 2013. №4(183). S. 320–326. (rus.)

11. **Zysin L.V., Steshenkov L.P.** Obobshchennyye rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy teploobmena pri razvitom puzyrkovom kipenii ryada mikrobiologicheskikh sred i modelnykh zhidkostey [Summary of the results of

experimental investigations of heat transfer in fully developed nucleate boiling range of microbiological media and model liquids]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU*. 2015. №1(214). S. 71–78. (rus.)

12. **Vayner A.S., Kuplenova N.S.** Nekotoryye fizicheskiye konstanty drozhzhevoy suspenzii [Some physical constants yeast suspension]. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost*. 1968. №4. S. 14. (rus.)

13. **Gutkovskiy B.S.** Issledovaniye raboty ustanovok po uparivaniyu posledrozhzhevoy brazhki [The Study of plants by process of evaporation of poslerostovoi brew]. *Sb. tr. VNIIGidroliz*, vyp. 28. L.:1978. S. 87–97. (rus.)

14. **Wakao Noriaki.** Sovremennyye teplonositeli v khimicheskoy tekhnologii [Modern heat transfer in chemical engineering]. *Kagaku kodze (Chem. Factory)*. 1975. Vol. 19. №1. S. 10–41 (yapon.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ЗЫСИН Леонид Владимирович** – доктор технических наук научный сотрудник Института интегративных исследований (ИИИ).

Geula 39, Haifa, 33197, Israel.

E-mail: lv\_zyssin@mail.ru

**ZYSSIN Leonid V.** – Integrative Research Institute.

Geula 39, Haifa, 33197, Israel.

E-mail: lv\_zyssin@mail.ru

**СТЕШЕНКОВ Леонид Петрович** – доктор технических наук профессор кафедры атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия. Санкт-Петербург. Политехническая ул. 29.

E-mail: steshenkov@spbstu.ru

**STESHENKOV Leonid P.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg. 195251, Russia.

E-mail: steshenkov@spbstu.ru