



DOI 10.5862/JEST.214.8
УДК 621.1.016:536.2

Л.П. Стешенков, Л.В. Зысин

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАЗВИТОМ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД И МОДЕЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

L.P. Steshenkov, L.V. Zyssin

GENERALIZED OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF HEAT EXCHANGE IN DEVELOPMENT OF NUCLEATE BOILING MICROBIOLOGICAL MATTER AND MODEL LIQUIDS

Приведены обобщенные результаты экспериментального исследования теплообмена при развитом пузырьковом кипении в вертикальных трубах и плоско-параллельных каналах ряда характерных для биотехнологии рабочих сред: культуральных жидкостей, нейтрализатов, гидролизатов, дрожжевой суспензии, водных растворов полиглюкина. Проведенный анализ экспериментальных результатов показал, что для ряда микробиологических сред расчет теплообмена при кипении может быть выполнен с помощью известных зависимостей. Опытные данные сопоставлены с известными зависимостями, на их основе предложены формулы, позволяющие в соответствующем опытам диапазоне изменения режимных параметров для условий стабилизированного течения в турбулентной и переходной областях течения выполнять инженерные расчеты аппаратов, где реализуется процесс развитого пузырькового кипения.

ТЕПЛООБМЕН; КОНВЕКЦИЯ; ВЫНУЖДЕННОЕ ТЕЧЕНИЕ; КИПЕНИЕ; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Summarized are the results of experimental investigation of heat transfer in fully developed nucleate boiling in vertical tubes and plane-parallel channels of some working environments typical for biotechnology: cultural liquids, neutralization, osteoporosis, groggily suspension, water solutions poliglyukina. The analysis of the experiment results showed that for a number of microbiological environments the calculation of boiling heat transfer can be accomplished using well-known dependencies. Experimental data are compared with the well-known dependencies and they are the basis for the formula allowing in the corresponding to the experiments the range of the regime parameters for the conditions of a stable flow in turbulent and transitional flow areas to perform the engineering calculations of the devices where the process of the developed nucleate boiling is actualized

HEAT TEXCHANGE, CONVECTION, FORSE FLOW, BOILING, EXPERIMENTAL RESEARCH.

Постановка и задачи исследования

Теплообмен при пузырьковом кипении обусловлен сложным взаимодействием недостаточно изученных по своей природе физических, физико-химических и других процессов, часто имеющих статистический характер. Поэтому в отличие от других областей конвективного теплообмена здесь до последнего времени мало общепризнанных экспериментальных фактов и нет единой точки зрения на систему опреде-

ляющих критериев подобия. Работ, базирующихся на определенных физических представлениях, относительно мало. Многочисленные экспериментальные данные, полученные для различных жидкостей, удается обобщить в виде ряда формул, отличающихся структурой и учитывающих разные, хотя, по-видимому, термодинамически связанные свойства жидкостей.

В работах С.С. Кутателадзе развита гидродинамическая теория кипения, в основу которой

положена аналогия процессов кипения и барботажа, позволившая получить для обобщения данных по кипению различных жидкостей в условиях свободной конвекции зависимость, имеющую в критериальной форме записи вид [1]

$$\text{Nu}_* = A \left(\text{Re}_* / M_*^2 \right)^{2/3}. \quad (1)$$

Здесь Nu_* , Re_* — соответственно числа Нуссельта и Пекле, при вычислении которых в качестве линейного размера принята капиллярная составляющая $\sqrt{\sigma / g(\rho' - \rho'')}$, где σ — поверхностное натяжение; ρ' и ρ'' плотности соответственно жидкостной и паровой фаз; g — ускорение свободного падения; M_* — число Маха для осцилляций в газодинамической смеси. Коэффициент A в формуле (1) может зависеть от геометрических характеристик поверхности нагрева и свойств жидкости (в частном случае — для дистиллированной воды — он составляет величину 0,0015).

Д.А. Лабунцов обобщил экспериментальные данные по кипению бензола, этилового спирта, фреонов, дифенила с помощью зависимости, полученной на основе анализа размерностей и термического сопротивления жидкой прослойки между стенкой и паровым пузырем [2]:

$$\alpha_{00} = b \left(\lambda^2 / \nu \sigma T \right)^{1/3} q^{2/3}. \quad (2)$$

Здесь α_{00} — коэффициент теплоотдачи при кипении; λ , ν , σ , T — соответственно теплопроводность, вязкость, поверхностное натяжение и температура жидкости; q — удельная тепловая нагрузка поверхности нагрева; b — коэффициент пропорциональности, который находится экспериментально.

Широкое распространение в технической литературе получила также формула Розенау [3], модифицированный вид которой для обычных жидкостей следующий:

$$\text{Nu}_* \approx \frac{1}{B_f} (\text{Re}_*)^{2/3} \text{Pr}^{-0,7}. \quad (3)$$

Здесь коэффициент B_f зависит от поверхностных условий, рода жидкости, материала стенки и ряда других факторов.

Хорошо известно также теоретическое соотношение Форстера — Зубера

$$\text{Nu} = 0,0015 \text{Re}^{0,6} \text{Pr}^{0,33}, \quad (4)$$

в котором Re и Nu определены выражением, зависящим от угла смачивания.

Предложен еще целый ряд зависимостей, основанных на термодинамическом подобии или иных соображениях, которые справедливы в относительно узком диапазоне определяющих параметров и типов жидкостей.

В свете изложенного создание инженерных методов теплофизических расчетов процессов и оборудования для биотехнологий, ускоренными темпами развивающихся в мире в последние десятилетия, требует как изучения возможностей распространения указанных выше зависимостей на микробиотехнологические среды, так и выявления специфических особенностей кипения новых технологических сред данного класса.

Микробиологическая технология базируется на закономерностях, свойственных популяциям микроорганизмов, как получаемых в промышленных условиях, так и существующих в реальных живых организмах. При этом, как мы отмечали в [4], биологическая форма движения материи с присущим ей многообразием определила ряд характерных особенностей микробиологических сред — биомассы, культуральной жидкости, продуктов метаболизма клеток и др. К этим особенностям относятся: вариабельность и многокомпонентность; низкие концентрации и скорости реакций; переменность в ходе процесса реологических свойств; проявление у белков одновременно свойств аморфных электролитов и коллоидных растворов и многое другое. Своеобразный характер модельных и масштабных переходов, многообразие форм биохимических реакций и процессов существенно повышают роль максимально приближенного к условиям промышленной технологии эксперимента, требуют проведения опытов на средах, полученных на реальном промышленном оборудовании из промышленного сырья и материалов. В этой связи в рамках настоящей работы ставились задачи экспериментального изучения теплообмена при пузырьковом кипении ряда характерных для микробиологических производств теплоносителей; цель — получить достоверные данные для инженерных расчетов и одновременно создать предпосылки для поиска подходов теоретических решений и обобщений.

Методические особенности исследования

Настоящее исследование — это продолжение описанного в [4]. В силу специфики микробиологических теплоносителей опыты проводились на реальных средах, отбираемых на различных стадиях различных технологических производств, а также на модельных растворах. С этой целью непосредственно на действующих производствах был создан ряд экспериментальных установок, рабочими участками в которых служили вертикальные плоско-параллельные каналы и трубы, имеющие эквивалентный диаметр 12–32 мм, длину 1000–6000 мм и снабженные предвключенным участком для гидродинамической стабилизации течения. В опытах на трубе диаметром 32 мм и длиной 6000 мм тепловой поток создавался с помощью наружного парового обогрева. В остальных случаях тепловой поток создавался с помощью электрического тока. Максимальная скорость исследуемых жидкостей в каналах составляла 3,5 м/с. С целью уточнения физических процессов, сопутствующих развитию кипения, для тех исследовавшихся сред, которые были оптически прозрачными, на визуализированном полоско-параллельном канале длиной 1000 мм проводились оптические исследования структуры кипящих потоков. При этом использовался теневой количественный метод, разработанный Л.А. Фельдбергом [5].

Тестирование экспериментальных установок производилось с помощью опытов на воде и водных растворах глицерина, которые дали хорошую сходимость с известными формулами [6].

Объектами исследования были: культуральные жидкости, дрожжевая суспензия и суспензия БВК в диапазоне весовой концентрации по абсолютно сухим веществам $C = 2,5–20\%$; отработанная культуральная бражка (ПДБ) в диапазоне $C = 1–15\%$; гидролизаты и нейтраллизаты при фиксированных значениях концентрации, соответствующих технологическим условиям. Кроме того, были исследованы водные растворы полиглюкина (заменителя крови) при $C = 0,1–10\%$ и глюкозы при $C = 2–25\%$. Опыты на водных растворах глицерина проводились при $C = 5–40\%$. 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 $\rho W =$

$= 290–2500$ кг/(м²·с) при недогревах жидкости до температуры насыщения, равных $\Delta T_s = 0–50$ °С; во всех опытах давление оставалось близким к атмосферному. Закономерности теплообмена изучались для условий стабилизированного течения в турбулентной и переходной областях течения.

Чтобы оценить точность и достоверность получаемых результатов, предварительные опыты проводились на дистиллированной воде. При этом результаты опытов по развитому кипению воды удовлетворительно согласовались с известными зависимостями для кипения как в каналах, так и в большом объеме (отклонения не превышали 15 %).

Основные результаты и их обсуждение

Визуальные исследования показали, что для всех испытывавшихся жидкостей, кроме гидролизата, на поверхности нагрева образовывались два типа пузырей, условно называемых нами газовыми и паровыми. Газовые пузыри возникают практически при любых недогревах, имеют размеры от 1 до 1,5 мм (при давлении 0,1 МПа), малоподвижны, передвигаются в направлении течения жидкости. Паровые пузыри возникают при условии, что температура стенки T_W выше температуры насыщения жидкости T_S ($T_S < T_W$); для них характерны быстрый рост, наличие времени ожидания, предшествующего отрыву, и отход от стенки практически по нормали к ней. Водные растворы полиглюкина отличались меньшей интенсивностью кипения по сравнению с остальными жидкостями, число центров парообразования было меньше, отрывные диаметры — тоже меньше. Для гидролизатов переход к режиму кипения визуально не фиксировался, поскольку значительно раньше наступала пенно-эмульсионная структура. Качественные изменения картины течения для этих жидкостей наблюдались только при переходе к развитому пузырьковому кипению и недогревах жидкости до температуры насыщения близких нулю ($\Delta T_s \approx 0$).

На рис. 1 приведена совокупность основных экспериментальных данных, обработанных в координатах зависимости (1); там же для сравнения нанесены рассчитанные по этой зависимости данные по теплоотдаче при кипении воды. Анализ совокупности экспериментальных данных

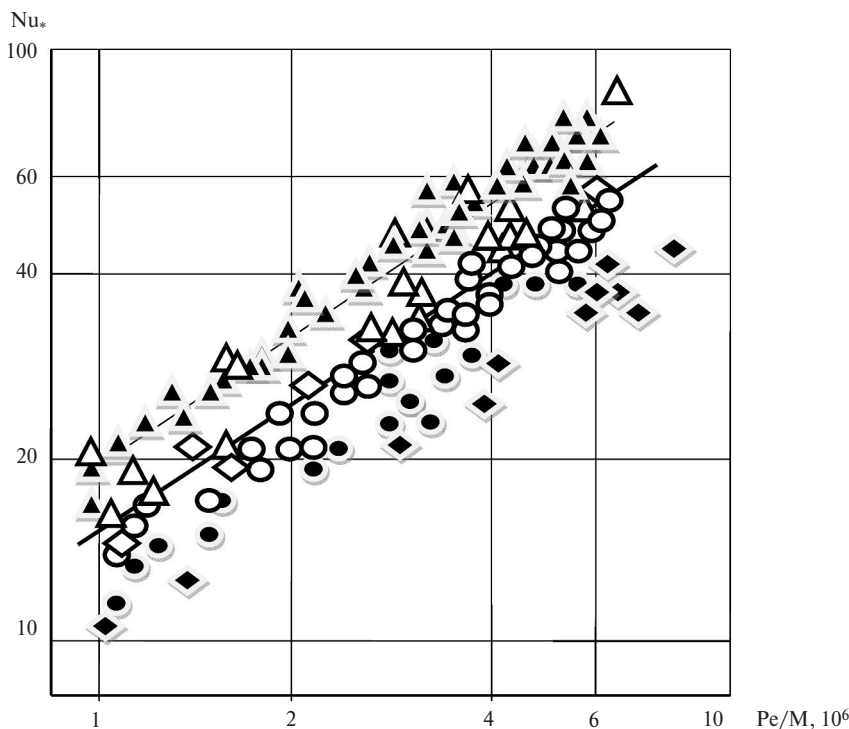


Рис.1. Сопоставление с зависимостью (1) экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении микробиологических сред:

◆ — полиглюкин; ● — глюкоза; ▲ — гидролизат; ○ — нейтрализат;
 △ — дрожжевая суспензия; ◇ — культуральная жидкость; — — вода;
 — — расчет по формуле (1)

по теплообмену при кипении, полученных в ходе проведенных опытов, позволил разделить исследовавшиеся среды на две группы.

Для ряда микробиологических сред — нейтрализата, отработанных культуральных жидкостей, водных растворов полиглюкина и глюкозы — опытные данные с погрешностью 25 % можно обобщить зависимостями вида (1), отличающимися только значением постоянного коэффициента A : для нейтрализатов, отработанных культуральных жидкостей, мало концентрированных водных растворов полиглюкина (при $C = 5\%$) — $A = 0,0018$; для гидролизатов — $A = 0,002$.

Другую группу составляют дрожжевые суспензии и водные растворы глюкозы и полиглюкина (при $C > 5\%$), для которых коэффициент A является переменным и зависит от концентрации сухих веществ C . При этом для дрожжевых суспензий наблюдается максимум теплоотдачи при $C = 10\%$ — см. рис. 2. Обработка результатов опытов на основе зависимости (2) дала практически те же результаты: качественных отличий

обнаружить не удалось, точность аппроксимации практически та же.

При обработке опытных данных на основе зависимости (3) из-за отсутствия полных данных о величине угла смачивания значения чисел Nu и Re принимались такими же, как и в формуле (1). Отличия в основном заключались в точности аппроксимации и не носили качественного характера. В табл. 1 приведены значения коэффициента B_f для формулы (3), полученные нами для микробиологических сред и некоторых других жидкостей. Для сравнения там же приведены некоторые данные других авторов.

Другую группу составляют растворы полиглюкина и дрожжевые суспензии, для которых зависимость теплоотдачи от концентрации носит сложный характер. Неводная часть дрожжевых суспензий состоит в основном из нелетучих веществ, находящихся в растворенном, коллоидном и взвешенном состоянии. Одновременно присутствует ряд различных летучих веществ. Физико-химические и термодинамические свойства большинства компонентов дрожжевых



Рис. 2. Влияние концентрации абсолютно сухих веществ на теплоотдачу при развитом кипении дрожжевой суспензии

(○ — дрожжевая суспензия; ▲ — вода)

Таблица 1

Значения коэффициента V_f в уравнении (3)

Комбинация «жидкость — поверхность»	V_f	Источник
Гидролизат — нержав. сталь	0,0075	Данные авторов
Нейтрализат — нержав. сталь	0,013	Данные авторов
Дрожжевая суспензия, $C = 20\%$ — нержав. сталь	0,097	Данные авторов
Дрожжевая суспензия, $C = 10\%$ — нержав. сталь	0,0075	Данные авторов
Дрожжевая суспензия, $C = 5\%$ — нержав. сталь	0,0115	Данные авторов
Полиглюкин, $C = 10\%$ — нержав. сталь	0,017	Данные авторов
Глюкоза, $C = 25\%$ — нержав. сталь	0,016	Данные авторов
Вода — нержав. сталь	0,013	Данные авторов
Вода — платина	0,013	Данные [3]
Вода — никель	0,006	Данные [3]
Этиловый спирт — медь	0,0025	Данные [3]
Бензол — хром	0,01	Данные [3]
K_2Cl_3 при $C = 35\%$ — медь	0,0054	Данные [3]
K_2Cl_3 при $C = 50\%$ — медь	0,0027	Данные [3]

суспензий не изучены. В настоящее время существует ряд подходов для описания процессов кипения многокомпонентных смесей и растворов. В частности [6], для бинарных растворов летучих веществ массоперенос при кипении часто характеризуют разностью концентраций в жидкой и парообразной фазах

$$\Delta C = C'' - C', \quad (5)$$

при этом в азеотропных точках системы $d\alpha/dC = 0$ и $\Delta C = 0$. Для кипения растворов смесей нелетучих веществ выражение (5) теряет смысл, так как в паровой пузырь переходит только растворитель и $C'' = 0$. Тогда для характеристики массопереноса может вводиться параметр

$$\Delta C = C_w'' - C_0, \quad (6)$$

где C_w' и C_0 — концентрации соответственно у стенки и в ядре потока. Поскольку в рассматриваемом случае определение параметров ΔC и $\Delta C'$ без специальных сложных в методическом отношении исследований не представляется возможным, то даже в сугубо приближенной постановке теоретический анализ влияния концентрации на механизм процессов кипения сопряжен со значительными трудностями.

В результате на данном этапе исследования мы ограничились учетом концентрации путем введения переменного эмпирического коэффи-

циента $K_c = f(C)$ [7]. Для исследованного диапазона режимных параметров была использована аппроксимация

$$K_c = \exp b(\ln C). \quad (7)$$

Введение K_c в рассмотренные выше обобщенные зависимости для кипения позволяет согласовать с ними данные по кипению дрожжевых суспензий. При таком подходе, например, формула (2) приобретает вид

$$\alpha_{00} = \left(\frac{\lambda^2}{\lambda \nu \sigma T} \right)^{1/3} q^{2/3} \exp 0,187 \times \times \left(47,3 + \frac{1}{\ln C} \right), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (8)$$

Данная формула обобщает опытные данные с точностью $\pm 10\%$, что иллюстрирует рис. 3.

Однако введение коэффициента типа K_c в формулы, имеющие определенную физическую основу, какими являются формулы (1)–(4), представляется нелогичным. Поэтому для тех микробиологических сред, теплоотдача при кипении которых не подчиняется известным зависимостям, мы ограничились установлением сугубо эмпирических размерных формул вида

$$\alpha_{00} = f(qC). \quad (9)$$

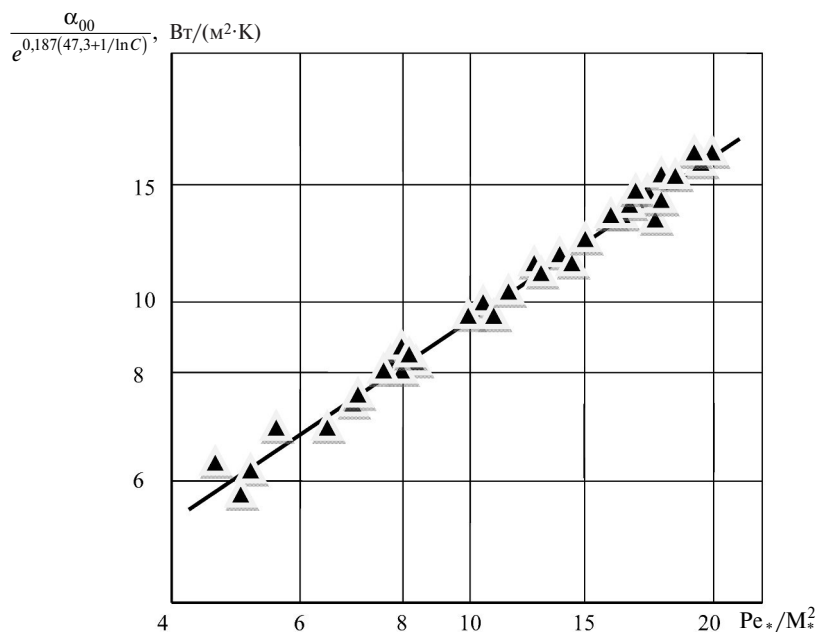


Рис. 3. Обобщение опытных данных по развитому пузырьковому кипению дрожжевых суспензий

Таблица 2

Сводка формул для расчета теплоотдачи при развитом кипении догретых до температуры насыщения микробиологических сред ($q = 200$, кВт/м²)

Среда	Формула для расчета теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	Область применения
Дрожжевая суспензия	$\alpha_{00} = 3,75q^{2/3} \exp 0,187 \left(47,3 + \frac{1}{\ln C} \right)$	$C = 20 \%$; $P = 0,1$ МПа
Гидролизаты	$\alpha_{00} = 6,1q^{2/3}$	$pH = 1-4$; $P = 0,1$ МПа
Нейтрализаты, культуральные жидкости	$\alpha_{00} = 0,75 \left(\lambda^2 / \nu \sigma T \right)^{\frac{1}{3}} q^{\frac{2}{3}}$	$pH = 1-4$; $P = 0,1$ МПа
Водные растворы полигюкина	$\alpha_{00} = 3,4q^{2/3} \exp 0,388 \left(24,27 + \frac{1}{\ln C} \right)$	$C = 1,5-10 \%$; $P = 0,1$ МПа
Водные растворы глюкозы	$\alpha_{00} = 3,4q^{2/3} \exp 0,213 \left(39,7 + \frac{1}{\ln C} \right)$	$C = 1-25 \%$; $P = 0,1$ МПа

На основании такого подхода было получено, в частности, выражение для гидролизатов:

$$\alpha_{00} = 6,1q^{2/3}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (10)$$

Для дрожжевых суспензий выражение (8) трансформируется к виду

$$\alpha_{00} = 3,75q^{2/3} \exp 0,187 \left(47,3 + \frac{1}{\ln C} \right), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (11)$$

Полная сводка формул для расчета теплоотдачи при развитом кипении микробиологических сред, полученных в ходе данного исследования приведена в табл. 2. Соответствие этих формул экспериментальным результатам — в пределах $\pm 10 \%$.

Малый диапазон изменения давления в опытах на позволил выявить влияние этого параметра на величину α_{00} .

Выводы

Анализ экспериментальных результатов показал, что для ряда микробиологических сред расчет теплообмена при кипении может быть выполнен с помощью известных зависимостей. Индивидуальные особенности этих сред могут учитываться с помощью постоянных коэффициентов. Исключение составляют дрожжевые суспензии и растворы полиглюкина, для которых зависимость теплоотдачи от концентрации носит сложный, немонотонный характер. Однако для всех изученных жидкостей сохраняется пропорциональность между α_{00} и $q^{2/3}$. Используя в качестве параметра концентрации абсолютно сухих веществ в изученных жидкостях, удалось получить частные эмпирические зависимости, позволяющие в диапазоне изменения режимных параметров, соответствующем опытам проводить инженерные расчеты выпарных аппаратов, решеферов и иных аппаратов, где реализуется процесс развитого пузырькового кипения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. 5-е изд. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.
2. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 388 с.
3. Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho Y.I. (Eds.) Handbook of Heat Transfer. McGraw-Hill Professional, 1998. 1344 p. ISBN:0-07-053555-8, 3rd ed.
4. Зысин Л.В., Стещенко Л.П. Особенности теплообмена при вынужденной конвекции микробио-

логических сред // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 4(183), Т.1. С. 320–326.

5. **Фельдберг Л.А., Добкес А.Л., Зысин Л.В., Саженин А.Г.** Исследования механизма кипения воды внутри вертикального канала при различных недогревах. Тепло- и массоперенос. Минск: АН БССР, 1976. Т. 8, часть II. С. 239–245.

6. **Кутателадзе С.С.** Теплоотдача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

7. **Зысин Л.В., Дорфман Е.А.** Теплоотдача при пузырьковом кипении некоторых органических веществ в каналах // Тезисы докладов VII-й Всесоюзной конф. «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах». Л., 1985. Т. 1.

REFERENCES

1. **Kutateladze S.S.** Osnovy teorii teploobmena. [Fundamentals of the theory of heat transfer.] 5-e izd. M.: Atomizdat, 1979. 415 s. (rus.)

2. **Labuntsov D.A.** Fizicheskiye osnovy energetiki. Izbrannyye trudy po teploobmenu, gidrodinamike, termodinamike [Physical bases of power. Selected works on heat transfer, fluid dynamics, thermodynamics]. M.: Izd-vo MEI, 2000. 388 s. (rus.)

3. **Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho Y.I.** (Eds.) Handbook of Heat Transfer. McGraw-Hill Professional, 1998. 1344 p. ISBN:0–07–053555–8, 3rd ed. (rus.)

4. **Zysin L.V., Steshenkov L.P.** Osobennosti teploobmena pri vynuzhdennoy konveksii mikrobiologicheskikh sred [Heat transfer in a forced convection microbiological media.]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 4(183), Т. 1. С. 320–326. (rus.)

5. **Feldberg L.A., Dobkes A.L., Zysin L.V., Sazhenin A.G.** Issledovaniya mekhanizma kipeniya vody vnutri vertikalnogo kanala pri razlichnykh nedogrevakh [Studies of the mechanism of boiling water inside the vertical channel for different subcooling.]. *Teplo- i massoperenos*. Minsk: AN BSSR, 1976. Т. 8, chast II. S. 239–245. (rus.)

6. **Kutateladze S.S.** Teplootdacha i gidrodinamicheskoye soprotivleniye: Spravochnoye posobiye. [Heat transfer and flow resistance: A Reference Guide.] M.: Energoatomizdat, 1990. 367 s. (rus.)

7. **Zysin L.V., Dorfman Ye.A.** Teplootdacha pri puzыrkovom kipenii nekotorykh organicheskikh veshchestv v kanalakh. [Heat transfer during nucleate boiling some organic substances in the channels.]. *Tezisy dokladov VII-y Vsesoyuznoy konf. «Dvukhfaznyy potok v energeticheskikh mashinakh i apparatakh»*. L., 1985. Т. 1. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СТЕШЕНКОВ Леонид Петрович — доктор технических наук профессор кафедры атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: steshenkov@spbstu.ru

ЗЫСИН Леонид Владимирович — доктор технических наук научный сотрудник Института интегративных исследований (ИИИ). Geula 39, Haifa, 33197, Israel. E-mail: lv_zyysin@mail.ru

AUTHORS

STESHENKOV Leonid P. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: steshenkov@spbstu.ru

ZYSSIN Leonid V. — Integrative Recherche Institute. Geula 39, Haifa, 33197, Israel. E-mail: lv_zyysin@mail.ru