

Л.В.Зысин, Л.П.Стешников.
(Prof. **Leonid V. Zyssin**, D.Sc.¹. Prof. **Leonid P. Steshenkov**, D.Ph.²)

**Обобщённые результаты экспериментальных
исследований теплообмена при развитии пузырькового
кипения ряда микробиологических сред и модельных
жидкостей**

Аннотация

Приводятся обобщённые результаты экспериментального исследования теплообмена при развитии пузырькового кипения в вертикальных трубах и плоско-параллельных каналах ряда характерных для биотехнологии рабочих сред: культуральных жидкостей, нейтрализаторов, гидролизаторов, дрожжевой суспензии, водных растворов полиглюкина. Опытные данные сопоставляются с известными зависимостями и на их основе предлагаются формулы, которые могут быть использованы для инженерных расчётов.

¹ Integrative Research Institute (IRI) - Department of Entrgodynamic's, Geula 39, Haifa, 33197, Israel, E-mail: admin@iri-as.org. - research fellow.

² Saint Petersburg Polytechnical University – Department of Heat Power Engineering. 29. Polytechnicheskaya. Saint-Petersburg. 195251. Russia.

Постановка и задачи исследования. Теплообмен при пузырьковом кипении обуславливается сложным взаимодействием недостаточно изученных по своей природе физических, физико-химических и других процессов, часто носящих 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 определяющих критериев подобия. Работ, базирующихся на определённых физических представлениях относительно мало. При этом многочисленные экспериментальные данные, полученные для различных жидкостей, удаётся обобщить рядом 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 сводной конвекции зависимость, имеющую в критериальной форме записи вид [1]:

$$Nu_* = A(Re_*/M_*^2)^{2/3}. \quad (1)$$

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'' плотность, соответственно, жидкостной и паровой фазы, g - ускорение свободного падения; M_* - число Маха для осцилляций в газодинамической смеси. Коэффициент A в формуле (1) может зависеть от геометрических характеристик поверхности нагрева, свойств жидкости и в частном случае для дистиллированной воды 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 пузырьком [2]:

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

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 распространения в технической литературе получила также формула Розенау [3], модифицированный вид которой для обычных жидкостей

$$Nu_* \approx \frac{1}{B_f} (Re_*)^{\frac{2}{3}} Pr^{-0,7}. \quad (3)$$

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

Хорошо известно также теоретическое соотношение Форстера-Зубера:

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

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

Предложен ещё 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 расчётов процессов и оборудования для биотехнологии, которая в последние десятилетия в мире развивается ускоренными темпами, требует как изучения возможностей распространения указанных выше зависимостей на микробиотехнологические среды, так и выявление специфических особенностей кипения данного класса новых технологических сред.

Микробиологическая технология базируется на закономерностях, свойственных популяциям микроорганизмов, получаемых как в промышленных условиях, так и существующих в реальных живых организмах. При этом, как отмечалось нами в [4], биологическая форма движения материи с присущим ей многообразием определила ряд характерных особенностей микробиологических сред (биомассы, культуральной жидкости, продуктов метаболизма клеток и др.). Сюда 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 эксперимента, максимально приближенного к условиям промышленной технологии; 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 с целью получения достоверных данных для инженерных расчётов и одновременного создания предпосылок для поиска подходов теоретических решений и обобщений.

Методические особенности исследования. Настоящее исследование явилось продолжением, описанному в [4]. Учитывая специфику 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 являлись вертикальные плоско-параллельные каналы и трубы, имеющие эквивалентный диаметр 12...32 мм, длину 1000...6000 мм и снабжённые предвключённым 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 плоско-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 являлись: культуральные жидкости, дрожжевая суспензия и суспензия БВК в диапазоне весовой концентраций по абсолютно сухим веществам $C=2,5...20\%$; отработанная культуральная бражка (ПДБ) в диапазоне $C=1...15\%$; гидролизаты и нейтрализаты 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 определялись 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), недогревах жидкости до температуры насыщения жидкости $\Delta T_s=0...50^{\circ}C$, во всех опытах давление оставалось близким к

атмосферному. Закономерности теплообмена изучались для условий стабилизированного течения в турбулентной и переходной областях течения.

С целью оценки точности и достоверности 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 объёме, отклонения не превышали 15%.

Основные результаты и их обсуждение.

Визуальные исследования показали, что для всех испытывавшихся жидкостей кроме гидролизата, на поверхности нагрева образовывалось 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), мало подвижны, 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 ΔT_s 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 результаты расчета по этой зависимости теплоотдачи при кипении воды. Анализ совокупности экспериментальных данных 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% обобщаются 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 (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, тонности аппроксимации практически та же.

При обработке опытных данных на основе зависимости (3) из-за отсутствия полных данных о величине угла смачивания значения Nu и Re принимались такими же, как и в формуле (1). Отличия, в основном, заключались в точности аппроксимации и не носили качественного характера. В таблице 1 приведены значения коэффициента B_f в формуле (3), полученных 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 не летучих веществ, находящихся в растворённом, коллоидном и взвешенном состоянии. Одновременно присутствует ряд различных летучих веществ. Физико-химические и термодинамические свойства большинства компонентов дрожжевых 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 $da/dC=0$ и $\Delta C = 0$. Для кипения растворов смесей не летучих 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 , соответственно, концентрации у стенки и в ядре потока. Поскольку в рассматриваемом случае в нами случае определение параметров ΔC и $\Delta C'$ без специальных сложных в методическом отношении исследований не представляется возможным, то даже в сугубо приближённой постановке теоретический анализ влияния концентрации на механизм процессов кипения сопряжён со значительными трудностями.

В результате на данном этапе исследования мы ограничились учётом концентрации путём введения переменного эмпирического коэффициента

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для дрожжевых суспензий выражение (8) трансформируется в вид

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

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

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

Выводы.

Проведенный анализ экспериментальных результатов показал, что для ряда микробиологических сред расчёт 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 не монотонный характер. Однако для всех изученных жидкостей сохраняется пропорциональность между α_{00} и $q^{2/3}$. Используя в качестве параметра концентрацию абсолютно сухих веществ и изученных жидкостях, удалось получить частные эмпирические зависимости, позволяющие в соответствующем опытам диапазоне изменения режимных параметров проводить инженерные расчёты выпарных аппаратов, решефёров и иных аппаратов, где реализуется процесс развитого пузырькового кипения.

Литература:

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – 5-ое изд. – М.: Атомиздат, 1979. – 415 с.
2. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. - М.: Издательство 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. Zyssin L.V., Steshenkov L.P. Forced convective heat transfer and hydrodynamic behavior of microbiological fluids
<уточнить>.....
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, т.8, часть II. – Минск: АН БССР, 1976. 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», т.1. Л.: 1985.

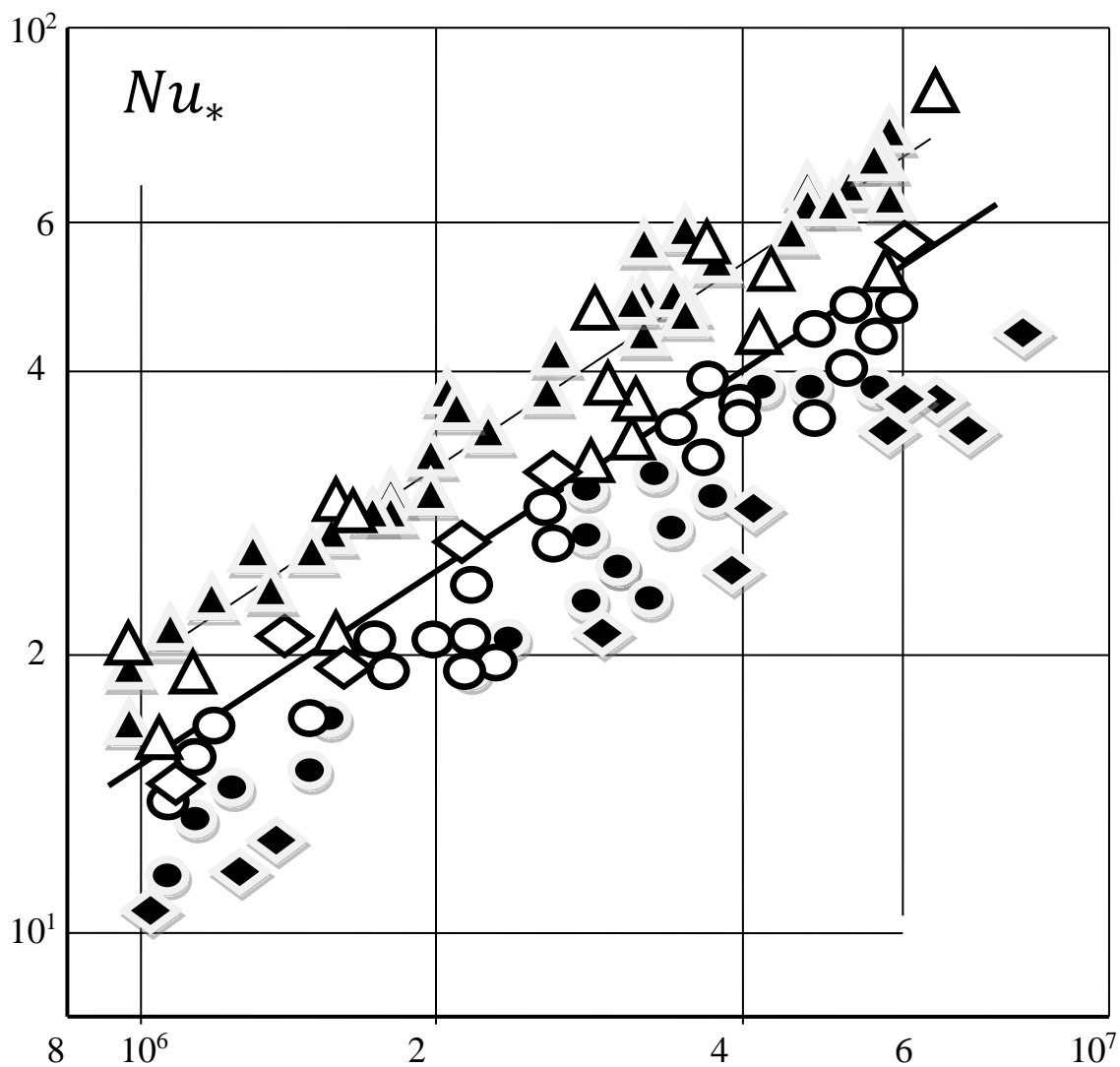


Рис.1. Сопоставление экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении микробиологических сред с зависимостью (1).

- ◆ - полиглюкин,
- - глюкоза,
- ▲ - гидролизат,
- - нейтрализат,
- △ - дрожжевая суспензия,
- ◇ - культуральная жидкость,
- - вода, расчет по формуле (1).

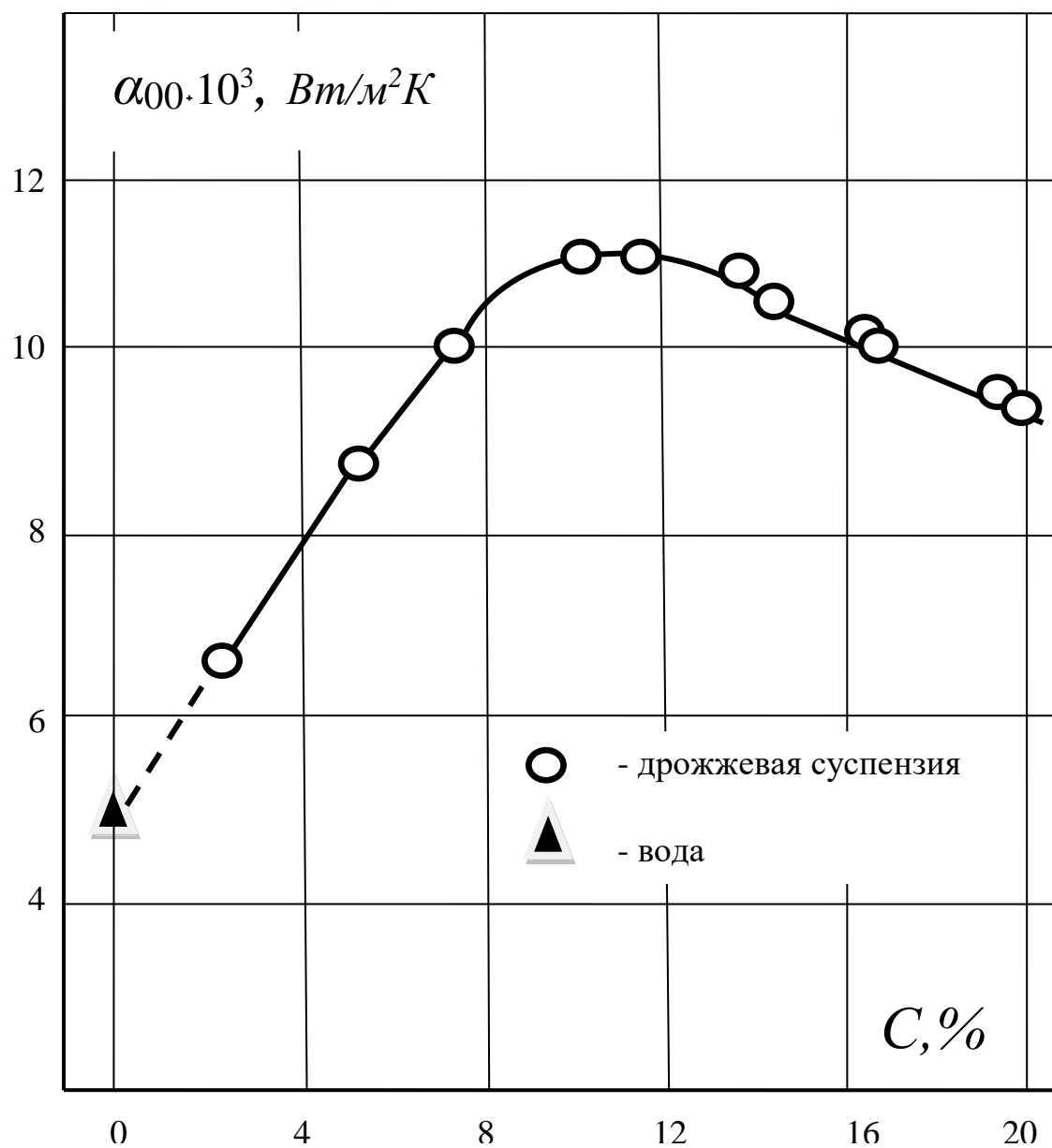


Рис.2. Влияние концентрации абсолютно сухих веществ на теплоотдачу при развитом кипении дрожжевой суспензии.

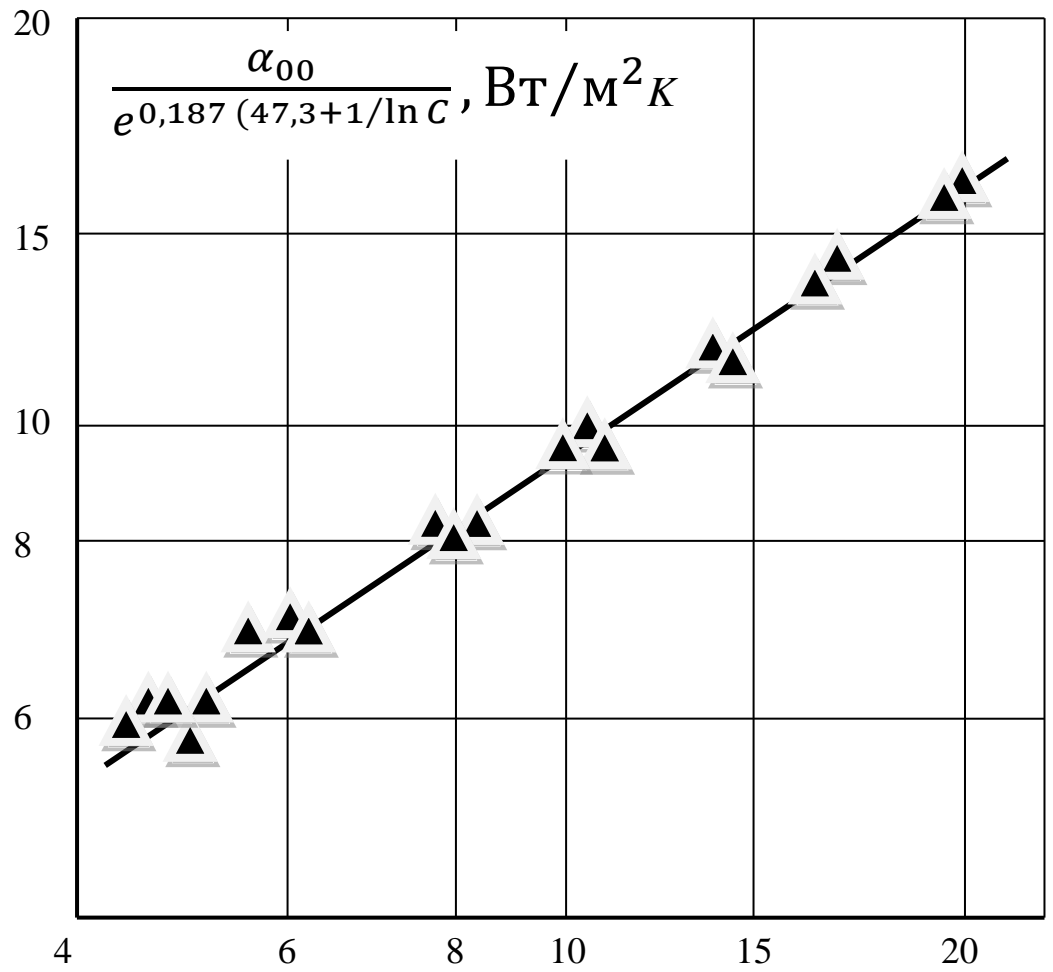


Рис.3. Обобщение опытных данных по развитому пузырьковому кипению дрожжевых суспензий.

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]
$K_2 Cl_3$, при $C=35\%$ - медь	0,0054	Данные [3]
$K_2 Cl_3$, при $C=50\%$ - медь	0,0027	Данные [3]

Таблица 2.

Сводка полученных в работе формул для расчёта теплоотдачи при развитии кипения догретых до температуры насыщения микробиологических сред ($q < 2 \cdot 10^5$, Вт/м²).

№	Среда	Формула для расчёта теплоотдачи, Вт/м ² К	Область применения
1	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.
2	Гидролизаты	$\alpha_{00} = 6,1q^{2/3}$	$pH = 1 \dots 4$; $P = 0,1$ МПа.
3	Нейтрализаты, культуральные жидкости	$\alpha_{00} = 0,75 (\lambda^2 / \nu \sigma T)^{\frac{1}{3}} q^{\frac{2}{3}}$	$pH = 1 \dots 4$; $P = 0,1$ МПа.
4	Водные растворы полигюкина	$\alpha_{00} = 3,4q^{2/3} \exp 0,388 \left(24,27 + \frac{1}{\ln C} \right)$	$C = 1,5 \dots 10$ %; $P = 0,1$ МПа.
5	Водные растворы глюкозы	$\alpha_{00} = 3,4q^{2/3} \exp 0,213 \left(39,7 + \frac{1}{\ln C} \right)$	$C = 1 \dots 25\%$; $P = 0,1$ МПа.