

Р. Г. Марданшин, А. К. Розенцвайг, Ф. С. Хайруллин

КИПЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В ЖИДКОСТНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ

Ключевые слова: теплообмен, кризис кипения, жидкостная эмульсия, низкокипящая дисперсная фаза, пузырьковое кипение.

В производственной сфере активно применяются эмульсии жидкостей и газожидкостные смеси в рамках технологических процессов, требующих эффективного тепло- и массообмена. В процессе обработки металлов режущие инструменты часто охлаждаются с помощью специальных жидкых эмульсий. При электрохимической обработке металлов происходит выделение тепла, а из зоны обработки удаляются газовые пузырьки и шламы с помощью потока электролита. Моделирование физических процессов помогает лучше понять их суть, особенно если модель и реальный процесс имеют схожие характеристики. Простые модели описывают фундаментальные физические явления и выражаются через безразмерные критерии подобия, основанные на теоретических предположениях и эмпирических данных. Для анализа кипения эмульсий жидкостей с низкокипящей дисперсной фазой была использована теория развитого кипения однородной жидкости у твёрдой стенки, разработанная Лабунцовым. Расчётная зависимость, полученная для эмульсии, была сопоставлена с экспериментальными данными, опубликованными в научных источниках. Результаты исследования показали, что теплообмен в эмульсии зависит от концентрации дисперсной фазы и происходит в двух режимах с различными механизмами пузырькового кипения. Полученные данные хорошо согласуются с результатами измерений плотности теплового потока при кипении эмульсий типа «вода-масло». Для решения подобных задач применяются численные методы и специализированное программное обеспечение для вычислительной гидродинамики, что позволяет оптимизировать работу различных устройств и систем.

R. G. Mardanshin, A. Kh. Rozenzvaig, F. S. Khairullin

BOILING OF A LOW-TEMPERATURE DISPERSED PHASE IN LIQUID EMULSIONS

Keywords: heat transfer, boiling crisis, liquid emulsion, low-boiling dispersed phase, bubble boiling.

Liquid emulsions and gas-liquid mixtures are actively used in the production sector as part of technological processes that require efficient heat and mass transfer. During metalworking, cutting tools are often cooled using special liquid emulsions. During electrochemical treatment of metals, heat is released, and gas bubbles and sludge are removed from the treatment area using an electrolyte stream. Modeling physical processes helps to better understand their essence, especially if the model and the actual process have similar characteristics. Simple models describe fundamental physical phenomena and are expressed through dimensionless similarity criteria based on theoretical assumptions and empirical data. To analyze the boiling of emulsions of liquids with a low-boiling dispersed phase, the theory of advanced boiling of a homogeneous liquid at a solid wall, developed by Labuntsov, was used. The calculated dependence obtained for the emulsion was compared with experimental data published in scientific sources. The results of the study showed that heat transfer in the emulsion depends on the concentration of the dispersed phase and occurs in two modes with different mechanisms of bubble boiling. The data obtained are in good agreement with the results of measurements of the heat flux density during boiling of water-oil emulsions. Numerical methods and specialized software for computational fluid dynamics are used to solve such problems, which makes it possible to optimize the operation of various devices and systems.

Введение

В промышленности для технологических процессов, связанных с теплообменом и массообменом, широко применяются многофазные дисперсные системы, такие как эмульсии несмешивающихся жидкостей и газожидкостные смеси. Например, при механической обработке металлов режущий инструмент охлаждают специальными жидкостными эмульсиями. В процессе электрохимической обработки металлов также выделяется тепло, а из зоны обработки потоком электролита выносятся продукты реакции — шламы и пузырьки газа.

Теоретические модели, описывающие перераспределение вещества и энергии в многофазных жидкостях, не могут быть выражены в общей аналитической форме. Однако только они способны дать представление о разнообразии и особенностях сложных процессов переноса. В условиях неравновесия, когда происходит обмен энергией и веществом, возникает сложное поведение системы, вызванное формированием *перекрёстных процессов* [1, с.37]. В этих процессах градиент одной

физической величины вызывает перенос другой. Взаимное влияние потоков импульса и теплоты в гетерогенных системах затрудняет выделение физических механизмов и определение их состава. Разнообразие и статистическая природа механизмов каждого из взаимосвязанных процессов усложняют не только их теоретическое описание, но и обоснование общих феноменологических соотношений.

Сведения о физической природе любого явления обычно представляются в виде феноменологической модели, которая описывает законы сохранения механических и термодинамических характеристик. Для сложных физических процессов аналитические уравнения неизвестны, поэтому их заменяют критериями подобия Π_1 , Π_2 , ..., Π_n . Безразмерные комбинации независимых переменных возникают, когда аналитические уравнения приводятся к безразмерному виду, и они соответствуют элементарным физическим явлениям, представленным в этих уравнениях [2].

Чтобы понять, как устроены процессы переноса в сложных дисперсных системах, нужно найти

безразмерные критерии, которые соответствуют элементарным физическим явлениям. Эти критерии помогут объяснить, как устроены процессы переноса. Модель можно представить в виде критериального соотношения. Его параметры можно обосновать, если сравнить их с экспериментальными данными и априорными характеристиками процессов переноса. С другой стороны, если сравнить критериальную зависимость с экспериментальными данными и найти статистически значимые критерии, то можно будет объяснить эмпирические данные, исходя из физических представлений, которые им соответствуют.

Результативность механизмов элементарных физических процессов, а также их взаимное воздействие напрямую связаны с размерами области их взаимодействия, которая определяется начальными и граничными условиями. В результате, приведение характерных масштабов элементарных физических процессов к согласованным значениям позволяет создавать сложные структуры процессов переноса. Эти структуры могут иметь заранее заданные свойства, такие как экономия энергии или ресурсов, оптимальные параметры работы промышленного оборудования. Это способствует повышению эффективности работы различных устройств [3], систем [4, 5, 6] или явлений [7, 8].

Элементарные физические явления в эмульсиях

Дисперсная фаза, которая имеет низкую температуру кипения, ускоряет теплообмен. Это происходит благодаря возникновению новых способов передачи тепла, связанных с задержкой кипения, а также особенностями образования зародышей в объёме капель, которые ограничены изменяющейся поверхностью раздела фаз. Поверхность раздела фаз создаёт условия для резонанса в конечном объёме капель дисперсной фазы. Это приводит к появлению собственных колебаний в этом объёме.

Энергия колебаний, которая возникает внутри капли, может усиливать энергию перегрева и

способствовать появлению пузырьков пара критического размера. С другой стороны, изменения давления, которые происходят при образовании или разрушении пузырьков пара, могут вызывать колебания поверхности капли, изменять её форму и приводить к нестабильности, которая в конечном итоге может привести к разрушению капли.

Фазовые превращения приводят к появлению новых способов передачи тепла и импульса, которые влияют на то, как дисперсная фаза взаимодействует с окружающей средой. Когда капли переходят в газообразное состояние, их становится больше, а это меняет их термодинамические и гидродинамические свойства, структуру потока и то, как он движется. Если есть определённые условия, то при фазовых превращениях дисперсной фазы может накапливаться больше тепла, чем без них.

Модельные решения, которые мы строим, могут дать нам понимание реальных физических процессов, только если они отражают их суть или хотя бы похожи на них. Самые простые модели описывают базовые физические явления. Их можно представить в виде соотношений между безразмерными критериями подобия, используя содержательные предположения, основанные на наглядных теоретических представлениях и информации, полученной в результате наблюдений.

Согласно теории подобия и размерностей, эти соотношения отражают физическую природу реальных явлений, которые они представляют. По мнению Л. Седова, эти соотношения потенциально содержат все возможные функциональные связи, соответствующие общей постановке математической задачи. При любой формулировке, которая уточняет постановку задачи, модель выражает физические законы, которым соответствует определённый набор критерии подобия.

В жидкости, даже если она однородна, процессы передачи тепла могут быть затруднены из-за гидродинамических особенностей её движения. В явном виде в двух или более членах уравнения переноса тепла содержатся характеристики ламинарного или турбулентного движения жидкости.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T = \frac{\lambda}{\rho c_p} \Delta T$$

Тепло, поглощаемое объемом жидкости в единицу времени

Конвективный перенос тепла, связанный с **макроскопическим движением жидкости**

Молекулярный перенос тепла, не связанный с макроскопическим движением (происходит даже в неподвижной жидкости)

$$+ \frac{\mu}{2\rho c_p} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right)^2$$

Перенос тепла, связанный с процессами **внутреннего трения в жидкости**, и выражается тензором вязких напряжений в жидкости

Из этой формулы видно, что тепло, поглощаемое объемом жидкости в единицу времени и конвективный перенос тепла, связанный с макроскопическим движением жидкости равносильно молекулярному переносу тепла, не связанного с макроскопическим движением (происходит даже в неподвижной жидкости) и

переносу тепла, связанного с процессами внутреннего трения в жидкости, и выражаемого тензором вязких напряжений в жидкости

В соответствии с теорией подобия, конвективный теплообмен без изменения состояния вещества можно описать с помощью ограниченного набора безразмерных критериев вида

- $Re = \rho v l / \mu$ - число Рейнольдса;
- $Pe = \rho c_p v l / \lambda$ - число Пекле;
- $Pr = \mu v c_p / \lambda$ - число Прандтля;
- $Nu = al / \lambda$ - число Нуссельта.

В гетерогенных эмульсионных системах, где происходят фазовые переходы, процесс теплопередачи становится более сложным. Для описания таких систем необходимо составить уравнения, которые будут учитывать свойства сплошной среды, каждой частицы дисперсной фазы и потоков тепла на границах раздела фаз. Уравнения Навье-Стокса, Лапласа и Фурье не могут полностью описать все механизмы теплопередачи в дисперсных системах.

Для исследования гетерогенных жидкостных теплоэнергетических систем необходимо учитывать процессы переноса, связанные со структурой сложных дисперсных систем. В зависимости от теплофизических свойств сплошной и дисперсной фаз, при перегреве эмульсии происходит вскипание только одной из них. Фазовые переходы дополнительно аккумулируют скрытую энергию теплоты парообразования и избыточную поверхностную энергию межфазной поверхности в жидкостном теплоносителе. Кроме того, при вскипании образуется паровая фаза, что приводит к увеличению объема жидкостной эмульсии и изменению структуры потока.

На схеме, изображенной на рис. 1, показана возможная система механизмов переноса тепла потоком жидкой эмульсии в условиях фазовых переходов. Для описания этой системы можно использовать следующий, далеко не полный список безразмерных параметров, которые для дисперсных систем рассчитываются отдельно для каждой фазы. Каждый из этих параметров отражает соотношение энергии, необходимой для запуска элементарных физических процессов:

$Eu = E_{\Delta P} / E_{\text{дин}} = \Delta P / (\rho_c U^2)$ - число Эйлера;

$We_{\text{дин}} = E_{\text{дин}} / E_{\sigma} = \rho U^2 d / \sigma$ - динамическое число Вебера;

$We_{\tau} = E_{\tau} / E_{\sigma} = \mu D U / \sigma$ - вязкостное число Вебера;

$We_{\Delta T} = E_{\Delta T} / E_{\sigma} = \rho_d c_p \Delta T d / \sigma$ - тепловое число Вебера капель;

$We_{Wo} = W_0 / (V_d / E \sigma) = W_0 / (d^2 \sigma)$ - термодинамическое число Вебера;

$We = E_{\text{дин}} / E_{\Delta T}$ - гидротепловое число Вебера;

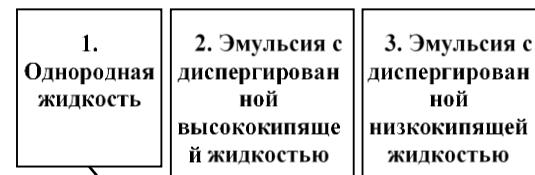
$We = (W_0 / V_d) / E_{\Delta T}$ - критерий спонтанного вскипания капель;

$Ja = E_{\Delta T} / E_{\text{исп}}$ - число Якоби, критерий парообразования;

$Fr = E_{\text{дин}} / E_g = \rho U^2 / (\Delta \rho g d)$ - число Фруда.

Множество параметров, которые необходимо учитывать, усложняют процесс изучения переноса, связанного с взаимодействием различных физических явлений. Важно правильно выбрать состав этих явлений, чтобы экспериментальные данные соответствовали выбранному критериальному выражению. Однако наличие статистически значимого безразмерного критерия в таком выражении может служить подтверждением реального влияния соответствующего ему элементарного механизма.

I. Условия фазовых превращений и образования межфазной поверхности в объеме среды переноса



II. Характер процессов внутри- и межфазного переноса теплоты

1. Однородный нагрев (без фазовых и структурных превращений)
2. Перегрев (неоднородный нагрев с образованием нежизнеспособных зародышей пара – пузырьковая резонансная структура)
3. Кипение (рост пузырьков пара и образование двухфазной структуры парожидкостной среды)
4. Тепловое разрушение (дробление и дефрагментация капель кипящей жидкости)

III. Элементарные механизмы процессов переноса теплоты

1. Кондуктивный (молекулярный) механизм в покоящейся жидкости
2. Механизм естественной конвекции
3. Механизм вынужденной конвекции в ламинарном потоке
4. Кондуктивный (молярный) механизм теплопереноса в турбулентном потоке
5. Механизм вязкой диссипации гидромеханической энергии
6. Механизм диссипации теплоты в пузырьковой среде
7. Массообменный механизм (теплота испарения и конденсации)

Рис. 1 – Механизмы теплообмена в жидкости и жидкостных эмульсиях

Fig. 1 – Heat transfer mechanisms in liquids and liquid emulsions

Модификация модели кипения низкотемпературной дисперсной фазы в жидкостных эмульсиях

Процесс парообразования в эмульсиях, содержащих низкокипящую дисперсную фазу, является сложным и быстропротекающим явлением, которое трудно визуализировать. Капли дисперсной фазы нагреваются за счёт высококипящей среды, которая служит поверхностью нагрева. Это приводит к изоляции капель в объеме эмульсии, что замедляет наступление кризиса кипения и повышает эффективность теплообмена. Однако до сих пор не до конца понятны физические процессы, происходящие при кипении в объеме капель дисперсной фазы, ограниченном межфазной поверхностью. Также существует недостаток

экспериментальных исследований теплообмена в жидкостных эмульсиях.

В качестве отправной точки для дальнейшего анализа были использованы результаты исследований, проведённых Лабунцовым в области развитого пузырькового кипения однородной жидкости у поверхности нагрева [9]. На основе обширного массива экспериментальных данных, полученных при кипении различных жидкостей с разными физико-химическими свойствами, Лабунцов вывел формулу

$$Nu_* = C Re_*^n Pr_l^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

$$\text{где } Nu_* = \frac{\alpha l_*}{\lambda_l}; Re_* = \frac{w_{*l_*}}{v_l}; Pr_l = \frac{v_l}{a_l}$$

Характеристики, которые входят в критерии безразмерности, можно рассчитать по следующим формулам:

$$n_s^* \sim \frac{1}{R_*^2}; l_* = R_* \frac{\rho_l c_{pl}}{2 \rho_v r} \Delta T \sim \frac{1}{\sqrt{n_s^*} 2 \rho_v r} \Delta T; a_l = \frac{\lambda_l}{\rho_l c_{pl}} \quad (2)$$

$$w_* = \frac{1}{R_*} \frac{\lambda_l \rho_l c_{pl}}{(\rho_v r)^2} \Delta T^2 \sim \sqrt{n_s^*} \frac{\lambda_l \rho_l c_{pl}}{(\rho_v r)^2} \Delta T^2, \quad (3)$$

где ρ_l - плотность жидкой фазы; ρ_v - плотность паровой фазы; c_{pl} - удельная теплоёмкость жидкой фазы при постоянном давлении; r - удельная теплота парообразования; ΔT - температурный перегрев; R_* - радиус парового зародыша критического размера; n_s^* - поверхностная плотность зародышей на поверхности нагрева; α - коэффициент теплоотдачи.

Численные значения постоянных в формуле (1) при кипении неметаллических жидкостей соответствуют следующим значениям:

1. при $Re_* \leq 0.01$ $C = 0.0625$; $n = 0.5$;
2. при $Re_* > 0.01$ $C = 0.125$; $n = 0.65$

Зависимость справедлива в области значений величин

$$Re_* = 10^{-5} \div 10^4; Pr_l = 0.86 \div 7.6.$$

В работе проведено формальное обобщение теории Лабунцова для кипения однородной жидкости у твёрдой стенки в более сложных условиях кипения водосодержащей эмульсии с низкокипящей дисперсной фазой. Для оценки обоснованности физических предпосылок, на основе которых была получена модифицированная аналитическая зависимость, было проведено сравнение с данными экспериментальных исследований, представленных в работе [10].

Основываясь на предварительных знаниях о свойствах капель воды в жидкой смеси, мы выдвинули ряд предположений, которые определяют рамки нашего исследования:

1. Капли низкокипящей дисперсной фазы эмульсии, которые находятся ближе всего к поверхности нагрева, становятся центрами образования пара в эмульсии. Это происходит из-за того, что поверхность каждой капли взаимодействует с колебаниями давления в сплошной фазе эмульсии. Эти колебания возникают, когда соседние капли начинают кипеть в тонком слое у поверхности нагрева, который по толщине сравним с размером капель.

2. Увеличение размера образующихся пузырьков пара в низкокипящих каплях происходит за счёт

тепла, которое передаётся через сплошную среду к поверхности раздела фаз. Это соответствует физическому явлению роста «поверхностных» пузырьков в однородной жидкости [9].

3. Толщина слоя у стенки сравнима с максимальным размером растущего пузырька, поэтому конденсация пузырька происходит только после того, как капли воды полностью испаряются и пузырёк выйдет за пределы перегретой области теплового пограничного слоя.

4. В случае разбавленных эмульсий, когда давление не слишком велико, объёмная концентрация капель воды составляет менее единицы ($F << 1$). При таких условиях паровая фаза многократно увеличивает объём низкокипящей дисперсной фазы.

В рамках этих предположений были исследованы результаты, которые могли бы быть получены при условии идентичности процессов, происходящих при кипении у поверхности нагрева однородной жидкости и капель воды в эмульсии. В модели Лабунцова параметр n_s^* , обозначающий количество действующих центров кипения на единицу поверхности нагрева, был заменён на аналогичный параметр для эмульсии n_{se}^* , который отражает количество капель тонкого перегретого слоя, способных к кипению, на единицу поверхности нагрева. Далее, теплофизические параметры однородной жидкости были заменены на параметры сплошной среды эмульсии. В этих условиях тепло отводится от поверхности нагрева только высококипящей сплошной средой. Источником зародышей паровой фазы становятся перегретые капли дисперсной фазы, а возникновение и схлопывание пузырьков способствуют равномерному распределению теплоты.

В более общем виде соотношения (2) и (3) можно представить, если вместо параметра n_s^* использовать параметр n_{se}^* , который учитывает влияние колебаний сплошной среды, вызванных испарением капель воды [2, 11, 12]

$$n_{se}^* = n_{se}, \quad (4)$$

где n_{se} - число капель в тонком перегретом слое эмульсии, приходящееся на единицу поверхности.

В воде всегда есть газовые, в частности воздушные пузырьки, размер которых близок к критическому значению [13, 14]. Это позволяет каплям дисперсной фазы перегреваться без необходимости в значительных внешних воздействиях. В результате уравнение (1) для кипения эмульсий можно модифицировать следующим образом

$$Nu_{*e} = C Re_{*e}^n Pr_s^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$\text{где } Nu_{*e} = \frac{\alpha l_{*e}}{\lambda_s}; Re_{*e} = \frac{w_{*e} l_{*e}}{v_s}; Pr_s = \frac{v_s}{a_s}$$

Параметры, входящие в состав безразмерных критериев, определяются из следующих соотношений

$$l_{*e} = \frac{1}{\sqrt{n_{se}^*} 2 \rho_v r} \Delta T; a_s = \frac{\lambda_s}{\rho_c c_{ps}}; w_{*e} = \sqrt{n_{se}^*} \frac{\lambda_s \rho_s c_{ps}}{(\rho_v r)^2} \Delta T^2 \quad (6)$$

где индекс « s » соответствует параметрам сплошной среды.

Сравнение модели кипения эмульсий с данными эксперимента

В работе [10] представлены результаты экспериментального исследования процесса вскипания водосодержащих эмульсий с низкотемпературной дисперсной фазой. Исследование проводилось при нагревании эмульсии с помощью нагретой платиновой проволоки длиной $l = 56$ мм и диаметром d около 100 мкм. Средний размер диспергированных капель воды, находящихся в эмульсии, составлял 35–40 мкм. Условия теплообмена в ходе эксперимента отличались от тех, которые предполагались в теории Лабунцова, где кипение рассматривалось у двухмерной твердой поверхности.

Чтобы сравнить теоретическую модель с результатами экспериментов, нужно преобразовать формулу (4) для случая, когда поверхность нагревается равномерно. Вместо исходного числа n_s^* капель эмульсии, приходящихся на единицу площади, мы будем использовать количество капель на единицу длины нагреваемой проволоки. Общее число капель в линейном слое нагреваемой проволоки длиной l будет равно $n_l \sim \sqrt[3]{nl}$. Тогда число капель в одном слое на единицу длины нагреваемой проволоки будет равно $n_s = \frac{\sqrt[3]{nl}}{\pi dl} = \frac{\sqrt[3]{n}}{\pi d l}$. Следовательно, число капель, которые испаряются с единицы поверхности, будет равно $n_{se}^* = \frac{\sqrt[3]{n}}{\pi d l}$. Зная зависимость между счётной n и объёмной F концентрацией капель дисперсной фазы, мы можем выразить число капель, которые испаряются с единицы поверхности, следующим образом

$$n_{se}^* = \frac{\sqrt[3]{3}}{4\pi} \frac{\sqrt[3]{F}}{\pi R_0 d}. \quad (7)$$

В случае с водосодержащими эмульсиями параметры, которые используются в критериальном уравнении (5), будут иметь следующие значения

$$l_{se} = \sqrt[6]{\frac{4\pi \sqrt{\pi R_0 d}}{3} \frac{\rho_s c_s}{2\rho_v r}} \Delta T \quad (8)$$

$$w_{se} = \sqrt[6]{\frac{3}{4\pi} \frac{\sqrt[3]{F}}{\sqrt{\pi R_0 d}} \frac{\lambda_s \rho_s c_{ps}}{(\rho_v r)^2}} \Delta T \quad (9)$$

В случае кипения эмульсий, которое происходит при значительных перегревах, коэффициент n принимают равным 0,65.

На графике рис. 2 для эмульсий, состоящих из воды и кремнийорганической жидкости ПЭС-5, а также воды и кремнийорганической жидкости ПМС-300, и для эмульсии вода/кремнийорганическая жидкость ПЭС-4 представлены расчётные кривые зависимости $Nu_{se} \Pr_s^{-\frac{1}{3}}$ от $Re_s^{0.65}$, полученные по формуле (5) при различных концентрациях. Теплофизические характеристики были взяты из источника [15] при температуре насыщения. Экспериментальные данные, опубликованные в работе [10], отмечены на графике точками.

Анализ данных демонстрирует, что экспериментальные результаты не являются однородными. Они разделились на две отдельные группы, которые были описаны двумя

математическими моделями. При этом первая модель хорошо описывает экспериментальные данные с низкими объёмными концентрациями (0,001–0,01%) для эмульсии вода/ПЭС-5, а вторая модель — с высокими концентрациями (от 0,1 и выше) для всех представленных эмульсий.

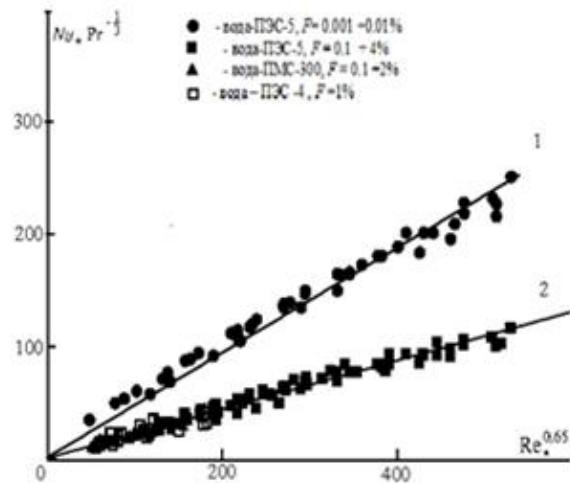


Рис. 2 – Сравнение с экспериментальными данными (показаны точками)

Fig. 2 – Comparison with experimental data (shown as dots)

Очевидно, что при увеличении концентрации дисперсной фазы характер кипения меняется. От первого пузырькового режима (0,0001–0,01%) происходит переход ко второму пузырьковому, но уже с паровой плёнкой (концентрация больше 0,1%). Это приводит к изменению механизмов элементарных физических явлений.

В жидкостных эмульсиях, где дисперсная фаза представлена низкокипящей жидкостью, кипение происходит неравномерно. Это проявляется в двух режимах теплообмена. Такое поведение связано с тем, что парообразование происходит не на поверхности нагрева, как при кипении однородной жидкости, а на некотором расстоянии от неё. Однако при определённой концентрации капель объём паровой фазы может вести себя подобно паровой плёнке и препятствовать передаче тепла к более удалённым каплям. В результате этого тепла, необходимого для вскипания капель, расположенных за паровой плёнкой, формирующейся перед поверхностью нагрева, может оказаться недостаточно.

Чтобы создать паровую завесу, нужно, чтобы капли низкотемпературной жидкости полностью испарились и пузырьки могли соединиться друг с другом. Для этого необходимо вычислить предельную объёмную концентрацию капель, используя соотношение $F \frac{\rho_v}{\rho_{l_{max}}} = 0,0006 = 0,06\%$. Эта концентрация соответствует границе между режимами кипения, как показано на рис. 1. С помощью линейной регрессии была определена константа С для кривой 2. Она оказалась равной 0,218 и была получена на основе анализа

экспериментальных данных, которые отличались от данных первой группы.

Экспериментальные данные, полученные в ходе эксперимента и относящиеся ко второму режиму кипения водосодержащих эмульсий, также могут быть успешно описаны с помощью критериального уравнения (5), как и в случае с однородной жидкостью. Однако в этом случае уравнение описывает процесс кипения только одного слоя капель у поверхности нагрева, когда $F > F_{max}$. Значение константы для модифицированной кривой 2 на рис. 1 с величиной оказалось близким к значению константы С, которая характеризует кипение однофазной жидкости у твердой стенки.

Заключение

Было продемонстрировано, что уравнение Лабунцова, основанное на критериях, хорошо описывает экспериментальные данные о кипении водосодержащих эмульсий с низкотемпературной дисперсной фазой у поверхности нагрева. Это позволяет предположить, что при кипении как однородной жидкости, так и водосодержащих эмульсий у поверхности нагрева действуют схожие механизмы теплообмена.

Выявлено существование двух режимов кипения эмульсий с низкотемпературной дисперсной фазой, что позволяет расширить теоретические знания о кипении водосодержащих эмульсий с низкотемпературной дисперсной фазой.

Литература

- Г. Николис, И. Пригожин, *Познание сложного: введение*. Пер. с англ. ЛКИ, Москва, 2008. 352 с.
- А. К. Розенцвайг, Ч. С. Страшинский, *TBT*, **49**, 1, 139-142 (2011).
- В. О. Ахметшин, А. Р. Ситдиков, Е. В. Варсегова, Я. Д. Золотоносов, *Строительные конструкции, здания, сооружения*, **1**, 1, С.33-39 (2022).
- Ю. Р. Каеева, А. М. Зиганшин, М. Б. Чухлова, *Известия КГАСУ*, **66**, 4, 346-356 (2023), DOI: 10.52409/20731523_2023_4_346, EDN: X0QLXY.
- А. М. Зиганшин, Г. Р. Сафиуллина, С. В. Еремина, А. А. Гайфуллин, *Известия КГАСУ*, **55**, 1, 58-70 (2021), DOI: 10.52409/20731523_2021_1_58.
- А. М. Зиганшин, С. В. Еремина, *Строительные конструкции, здания и сооружения*, **2**, 1, 25-31 (2023).
- Б. А. Агафонов, Р. Р. Сарчин, Л. Э. Осипова, Е. В. Варсегова, *Строительные конструкции, здания и сооружения*, **1**, 1, 40-49 (2022).
- Ю. Р. Каеева, Р. Р. Закиева, *Известия КГАСУ*, **58**, 4, 82-89 (2021). DOI: 10.52409/20731523_2021_4_82.
- Д. А. Лабунцов, *Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике*. МЭИ, Москва, 2000. 388с.
- Н. В. Буланов, Б. М. Гасанов, Е. А. Турчанинова, *TBT*, **44**, 2, 268-284 (2006).
- А. К. Розенцвайг, Ч. С. Страшинский, *ЖПХ*, **82**, 8, 1314-1319 (2009).
- А. К. Розенцвайг, Ч. С. Страшинский, *Инновационная наука*, **2**, 12, 138-142 (2015). EDN: VDQWHF.
- Ю. А. Зейгарник, Д. Н. Платонов, К. А. Ходяков, Ю. Л. Шехтер, *TBT*, **50**, 1, 83-88 (2012).
- Ю. А. Зейгарник, К. А. Ходяков, Ю. Л. Шехтер, *TBT*, **50**, 3, 436-441 (2012).
- Н. Б. Варгафтик, *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. 2-е изд., Наука, Москва, 1972. 310 с.

References

1. G. Nikolis, I. Prigogine, *Complexity: An Introduction*. Translated from English. LKI, Moscow, 2008. 352 pp.
2. A. K. Rozenzweig, Ch. S. Strashinsky, *TBT*, **49**, 1, 139-142 (2011).
3. V. O. Akhmetchin, A. R. Situdkov, E. V. Varsegova, Ya. D. Zolotonosov, *Building Structures, Buildings, Structures*, **1**, 1, pp. 33-39 (2022).
4. Yu. R. Kareeva, A. M. Ziganshin, M. B. Chukhlova, *News of KSUAE*, **66**, 4, 346-356 (2023), DOI: 10.52409/20731523_2023_4_346, EDN: X0QLXY
5. A. M. Ziganshin, G. R. Safiullina, S. V. Eremina, A. A. Gayfullin, *Izvestiya KSUAE*, **55**, 1, 58-70 (2021), DOI: 10.52409/20731523_2021_1_58
6. A. M. Ziganshin, S. V. Eremina, *Building Structures, Buildings and Structures*, **2**, 1, 25-31 (2023).
7. B. A. Agafanov, R. R. Sarchin, L. E. Osipova, E. V. Varsegova, *Building Structures, Buildings and Structures*, **1**, 1, 40-49 (2022).
8. Yu. R. Kareeva, R. R. Zakieva, *News of KSUAE*, **58**, 4, 82-89 (2021). DOI: 10.52409/20731523_2021_4_82.
9. D. A. Labuntsov, *Physical Foundations of Energy. Selected Works on Heat Transfer, Hydrodynamics, Thermodynamics*. MEI, Moscow, 2000. 388 p.
10. N. V. Bulanov, B. M. Gasanov, E. A. Turchaninova, *TBT*, **44**, 2, 268-284 (2006).
11. A. K. Rozenzweig, Ch. S. Strashinsky, *ZhPH*, **82**, 8, 1314-1319 (2009).
12. A. K. Rozenzweig, Ch. S. Strashinsky, *Innovative Science*, **2**, 12, 138-142 (2015). EDN: VDQWHF
13. Yu. A. Zeigarnik, D. N. Platonov, K. A. Khodyakov, Yu. L. Shekhter, *TBT*, **50**, 1, 83-88 (2012).
14. Yu. A. Zeigarnik, K. A. Khodyakov, Yu. L. Shekhter, *TBT*, **50**, 3, 436-441 (2012).
15. N. B. Vargaftik, *Reference Book on the Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. 2nd ed., Nauka, Moscow, 1972. 310 p.

© Р. Г. Марданшин – канд. физ. -мат. наук, доцент кафедры Информационных систем и технологий в строительстве, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, mardanrif@mail.ru; А. Л. Розенцвайг – д-р техн. наук, проф. кафедры Математических методов в экономике, Набережно-Челнинский институт Казанского федерального университета; Ф. С. Хайруллин – д-р физ. -мат. наук, проф. кафедры Основ конструирования и прикладной механики, Казанский национальный исследовательский технологический университет, x_farid@mail.ru.

© R.G. Mardanshin – PhD (Physical and Mathematical Sci.), Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies in Construction, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russia, mardanrif@mail.ru; A. L. Rosenzvayg – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the Department of Mathematical Methods in Economics, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia; F. S. Khairullin – Doctor of Sciences (Physical and Mathematical Sci.), Professor of the Department of Fundamentals of Design and Applied Mechanics, Kazan National Research Technological University, x_farid@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 21.05.25.
Дата принятия рукописи в печать – 06.10.25.