

СТАТЬИ

УДК 621.892.6:66.046.7

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ КАПЕЛЬ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ НА ГИДРОДИНАМИКУ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ**Розенцвайг А.К.***Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт (филиал),
Набережные Челны, e-mail: a_k_r@mail.ru*

Работа посвящена анализу фазовых превращений при использовании эмульсий несмешивающихся жидкостей для охлаждения твердых поверхностей нагрева. Изучено влияние парообразования внутри низкоккипящих капель дисперсной фазы на характеристики турбулентного течения сплошной среды жидкостной эмульсии. Рассмотрены структуры парожидкостных агрегатов, формирующиеся при различных сценариях образования и роста пузырьков пара в объеме диспергированных капель. Каждой структуре соответствует свой режим сложного процесса теплообмена, который обусловлен соответствующим составом возможных элементарных физических явлений. Показано, что изменение размера двухфазных капель при этом обуславливает неоднозначный характер взаимодействия их с потоком сплошной среды. Так капли, размер которых превышает микромасштаб турбулентных пульсаций, взаимодействуют с ними динамическим образом под воздействием инерциальных сил. В противном случае их взаимодействие носит иной характер, характеризующийся вязкими сдвиговыми напряжениями. Но в любом случае они вносят возмущения в поток сплошной среды, влияют на пульсации скорости в турбулентном потоке и усложняют характер теплообмена в эмульсиях. Таким образом, модели сложных процессов теплообмена в гетерогенных дисперсных системах с фазовыми превращениями необходимо формализовывать с системными структурными представлениями. В частности, использовать в качестве структурных элементов полумпирических соотношений механизмы элементарных физических явлений. Показано, как, исходя из физических представлений, формируются гипотетические структуры взаимосвязанных теплофизических и гидродинамических явлений. На основе таких структур обосновываются соответствующие им наборы безразмерных критериев, входящих в модельные соотношения, адекватность и значения эмпирических констант которых устанавливаются сопоставлением с данными теоретического анализа и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: жидкостные эмульсии, турбулентность, фазовые превращения, парожидкостные капли, кипение, структура сложного теплообмена

EFFECT OF PHASE CHANGES OF DISPERSAL PHASE STRAINS ON HYDRODYNAMICS OF LIQUID EMULSIONS**Rozentsvaig A.K.***Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny (Branch) Institute,
Naberezhnye Chelny, e-mail: a_k_r@mail.ru*

The article is devoted to the analysis of phase changes when using emulsions of immiscible liquids for cooling solid heating surfaces. The influence of vaporization inside low-boiling droplets of the dispersed phase on the characteristics of the turbulent flow of a continuous medium of a liquid emulsion is studied. The structures of vapor-liquid aggregates formed under various scenarios of formation and growth of vapor bubbles in the volume of dispersed droplets are considered. Each structure corresponds to its own mode of complex heat transfer process, which is due to the corresponding composition of possible elementary physical phenomena. It is shown that the change in the size of two-phase drops in this case causes an ambiguous character of their interaction with the flow of a continuous medium. Thus, drops whose size exceeds the micro-scale of turbulent pulsations interact with them dynamically under the influence of inertial forces. Otherwise, their interaction is of a different nature, characterized by viscous shear stresses. But in any case, they introduce disturbances to the flow of a continuous medium, affect the velocity pulsations in a turbulent flow, and complicate the nature of heat exchange in emulsions. Thus, models of complex heat transfer processes in heterogeneous dispersed systems with phase transformations must be formalized by system structural representations. In particular, the mechanisms of elementary physical phenomena should be used as structural elements of semiempirical relations. It is shown how hypothetical structures of interdependent thermophysical and hydrodynamic phenomena are formed based on physical representations. On the basis of such structures, the corresponding sets of dimensionless criteria included in the model relations are justified. The adequacy and values of the empirical constants of these criteria are established by comparison with the data of theoretical analysis and experimental research.

Keywords: liquid emulsions, turbulence, phase transformations, steam-liquid drops, boiling, complex heat exchange structure

Эмульсии несмешивающихся жидкостей широко используются в качестве рабочих и охлаждающих жидкостей в самых разнообразных отраслях промышленности. Причем практический интерес к ним обычно связан с совершенствованием и оптимизацией общих теплофизических и гидродинамических характеристик многофазных гетерогенных течений. Эти характеристики во многом определяют характер целевых физических процессов, связанных с трансформацией перегретых капель дисперсной фазы и взаимодействием с турбулентным потоком высококипящей сплошной

наимических характеристик многофазных гетерогенных течений. Эти характеристики во многом определяют характер целевых физических процессов, связанных с трансформацией перегретых капель дисперсной фазы и взаимодействием с турбулентным потоком высококипящей сплошной

ной среды [1]. Сложность теплообмена в условиях совместного протекания разнородных физических процессов связана, в первую очередь, с разнообразием механизмов взаимодействия капель с потоком в зависимости от характера и масштабов движения сплошной среды [2]. Это выражается деформацией капель вязкими сдвиговыми силами потока [3] и, в определенных условиях, разрушением их динамической энергией турбулентных пульсаций [4]. Затем образование и рост пузырьков пара в объеме перегретых капель приводит к образованию парожидкостных агрегатов с различной структурой, которая активизирует в эмульсии различные механизмы перераспределения теплоты. И наконец, изменение спектра размеров дисперсной фазы влияет на эффективность переноса теплоты и состояния потока сплошной среды.

В изотермических условиях при движении неустойчивой эмульсии в турбулентном режиме увеличение размеров капель может происходить только за счет коалесценции, а концентрация дисперсной фазы не меняется. При этом взаимодействие дисперсной фазы со сплошной средой носит механический характер и обусловлено только размером капель. Когда размер капель не превосходит микромасштаб пульсаций скорости, взаимодействие выражается увеличением эффективной вязкости мелкодисперсной эмульсии. Если размер капель превосходит масштаб пульсаций скорости сплошной среды, то взаимодействие принимает динамический характер, и в результате наблюдается гашение турбулентных пульсаций. Но гидравлический расчет неустойчивых эмульсий представляет собой более сложную задачу, чем это имеет место для однородных дисперсных систем, сохраняющих достаточно длительное время стабильные реологические характеристики. Так, гашение турбулентных пульсаций в крупнодисперсных эмульсиях инициирует аномальные реологические эффекты, которые обусловлены неравновесностью дисперсной фазы [5].

При кипении жидкостной эмульсии и формировании в перегретых каплях паровой фазы увеличивается не только их размер, но и объем диспергированной жидкости. Поверхностью нагрева для капель дисперсной фазы служит межфазная граница с высокотемпературной сплошной средой, которая опосредует теплопередачу от поверхности нагрева. При этом фазовые превращения локализованы в объеме капель и носят сложный, быстротекущий и не поддающийся визуализации характер. Они влияют как на характер и интенсив-

ность распределения теплоты, так и на гидродинамические характеристики потока эмульсии. Однако до настоящего времени нет полной ясности относительно физических представлений о механизмах кипения в объеме капель дисперсной фазы, ограниченном межфазной поверхностью. Также довольно немногочисленными являются и экспериментальные исследования теплообмена в жидкостных эмульсиях [6; 7].

Одной из основных причин этого является очень большое число размерных теплофизических и гидродинамических параметров для каждой из двух жидких фаз и паровой фазы одной из них. Причем некоторые из них взаимосвязаны и могут входить в состав нескольких физических явлений, что затрудняет обычный параметрический анализ. Другой причиной является значительное влияние расходных и геометрических параметров, которые формируют структуру и состав активированных в этих условиях механизмов физических явлений. Вместе они образуют сложную совокупность взаимосвязанных механизмов физических явлений, которая определяет в конечном итоге режимы и эффективность технологических процессов. Поэтому даже в более простых случаях требуется качественный анализ возможных сценариев реализации сложных физических явлений [8–10].

Формирование в этих условиях режимных характеристик теплофизических процессов в дисперсной фазе и сплошной среде эмульсии оказывается взаимосвязанным, поскольку состояние каждой из них влияет на перенос массы, импульса и энергии в другой. Разнообразие этой взаимосвязи во многом влияет на адекватность как аналитических, так и эмпирических моделей контролируемого поведения эмульсий в самых различных производственных и технологических условиях.

Целью исследования является представление структуры сложных теплофизических процессов при моделировании неизоэнтальпических жидкостных эмульсий, обоснование адекватных феноменологических критериальных соотношений для характеристики переноса теплоты с фазовыми превращениями в дисперсной фазе эмульсии, создание теоретических предпосылок для разработки энергосберегающих технологий.

Материалы и методы исследования

Общие методы анализа теплофизических характеристик эмульсий несмешивающихся жидкостей с фазовыми превращениями во многом ограничены отсутствием общих аналитических моделей. Многофак-

торный и неоднозначный характер физических процессов можно раскрыть только более общими системными представлениями. Для снижения большого числа размерных переменных необходима редукция их до уровня, достаточного для адекватного отражения характера в частных условиях изучаемого реального процесса. Этому способствует предварительная спецификация состава и структуры моделей на основе формирующих их базовых элементов – механизмов элементарных физических явлений анализа и соответствующих им безразмерных критериев. Наряду со спецификацией всех возможных элементов сложных моделей переноса необходима формализация характера их совместного протекания, который нельзя получить с помощью общих методов теоретического анализа. Обычно это делается на основе характерных особенностей предметной области и данных экспериментальных исследований [2; 8; 11].

Детализация особенностей предметной области на основе качественных наглядных представлений и согласование их с данными экспериментальных исследований необходимо для уточнения модельных констант. Эта детализация полностью основывается на существующих теоретических представлениях относительно каждого из элементарных физических явлений, включаемых в состав предлагаемой модели [12; 13]. Дальнейший анализ ограничен рассмотрением особенностей кипения только в объеме капель, диспергированных в недогретой сплошной среде.

Особенности процесса кипения в объеме диспергированных капель

Сложность моделирования кипения в ограниченном межфазной поверхностью объеме жидкости обусловлена тем, что в принципе могут быть реализованы все известные режимы парообразования. Это и кипение у поверхности нагрева, и гомогенная нуклеация в объеме перегретой жидкости, и испарение с межфазной поверхности.

Жизнеспособные пузырьки пара могут образовываться в приграничном слое на внутренней (вогнутой) стороне деформируемой межфазной поверхности капель перегретой жидкости. Рост критических пузырьков пара внутри капель не может завершаться отрывом их от поверхности нагрева и способствовать сильной турбулизации кипящей жидкости, характерной для кипения у поверхности нагрева в неограниченном объеме. При этом замкнутая поверхность нагрева обуславливает сохранение массы дисперсной фазы, но из-за парообразования

её объем и термодинамическое состояние будут изменяться, аккумулируя тепловую энергию сплошной среды.

Изменение объема кипящих капель при переходе диспергированной жидкости в парообразное состояние сопровождается движением деформируемой межфазной поверхности, которое вносит возмущения в объем окружающей сплошной среды. Характер движения межфазной поверхности определяется притоком теплоты от сплошной среды. Он может быть монотонным, если теплота обеспечивает постоянное парообразование. Объем капель только увеличивается вплоть до полного перехода капель в парообразное состояние, и теплообмен будет носить нестационарный характер. Если приток теплоты недостаточен и температура в тепловом пограничном слое периодически опускается ниже температуры насыщенных паров, он может носить колебательный характер.

Недостаток внешней энергии восполняется скрытой теплотой парообразования из-за конденсации паровой фазы в диспергированной жидкости. При этом объем капель уменьшается. Когда процесс испарения повторяется, он снова увеличивается. Процесс теплообмена при этом носит стационарный, но периодический характер. Частота периодических колебаний объема при умеренном перегреве может совпадать с частотой собственных колебаний парожидкостной капли переменного размера и создавать условия для теплового резонансного разрушения даже в неподвижной эмульсии.

Если объем капель достаточно мал, то при высокой плотности теплового потока происходит его полный перегрев, достаточный для гомогенного режима кипения. Пузырьки пара будут образовываться внутри капли, укрупняться и создавать паровое ядро, а диспергированная жидкость примет форму шарового слоя у поверхности капли. Размер парового ядра может увеличиваться также при испарении жидкости из шарового слоя.

Следует отметить, что состояние термодинамического равновесия, подобного динамическому равновесию в недогретой эмульсии, наступить не может, поскольку тепловой рост капель может продолжаться до полного перехода их в парообразное состояние. При турбулентном движении кипящей эмульсии с увеличением парожидкостных капель до критического устойчивого размера могут появиться. В зависимости от гидродинамических условий разрушение может носить резонансный или градиентный характер.

Качественные физические представления тепловых процессов внутри перегретых капель жидкости в эмульсии

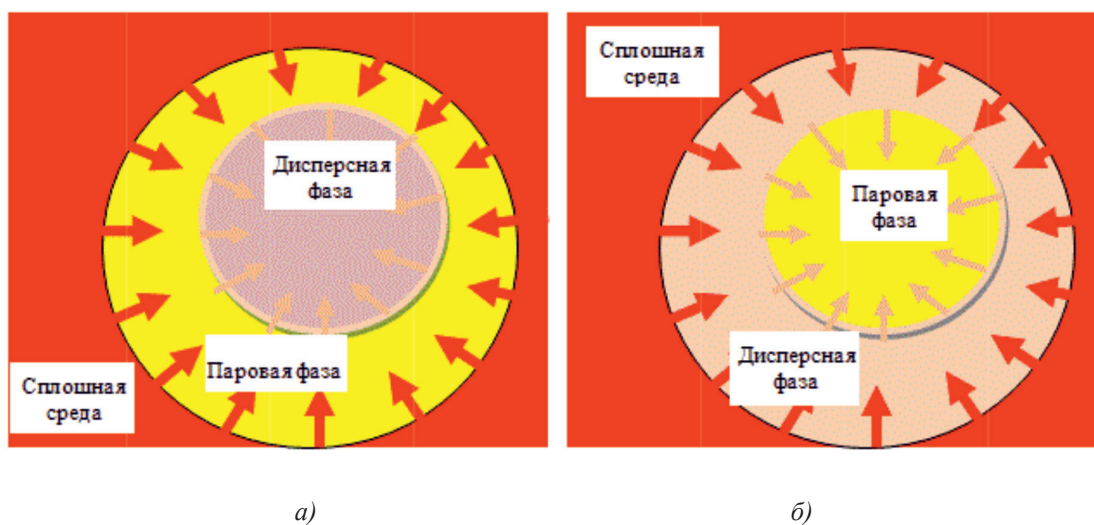
Прогрев капель дисперсной фазы происходит от начальной температуры $T_{d,0}$ до температуры сплошной среды $T_{c,f} > T_{d,0}$, если она не достигает температуры ее насыщенных паров $T_{sat,d}$. В недогретой сплошной среде температура жидкости меньше температуры ее насыщенных паров $T_{sat,d} > T_{c,f}$ и она сохраняет однородное состояние. Но если имеет место перегрев каплей $T_{c,f} > T_{d,0} > T_{sat,d}$, то создаются условия для вскипания диспергированной жидкости. Парожидкостная структура каплей формируется в соответствии с соотношением величин их поверхностного натяжения [14]. Теплообмен при этом принимает более сложный, неоднозначный характер, который во многом предопределен структурой парожидкостного агрегата и структурой теплового потока в сложной гетерогенной среде с различными межфазными поверхностями.

Тепловой поток от сплошной среды при неограниченной продолжительности способен в принципе перегреть весь объем высококипящих капель до температуры сплошной среды. Однако низкокипящая дисперсная фаза при $T_{sat,d} < T_{c,f}$ испытывает фазовое превращение, и часть тепловой энергии будет расходоваться на образование и рост в ней паровых зародышей. В противном случае условия будут способствовать обратному процессу – конденсации, который ведет к снижению объема паровой фазы. Проблема состоит в том, в каждом случае влияют на теплообмен только не-

которые из однотипных теплофизических характеристик каждой из двух жидких и одной паровой фазы.

Когда дискретные пузырьки пара образуются около межфазной поверхности, кипение носит гетерогенный характер, аналогичный классическому случаю кипения жидкости у твердой стенки. Однако существенным отличием является то, что они не могут всплывать и со временем способны сформировать сплошной шаровой слой. Он напоминает кризис кипения у твердой стенки и также способен сдерживать прогрев жидкого ядра парожидкостных капель. Прямой прогрев жидкости во внутренней части капли вначале частично, а затем и полностью прекратится. Сценарий теплообмена, когда шаровой слой паровой фазы по мере прогрева будет утолщаться за счет испарения из жидкого ядра капли, представлен на рисунке а. Парообразование сменит механизм гетерогенной нуклеации на другой механизм, представленный испарением в прогретый паровой слой со свободной поверхности жидкости. Когда шаровой слой достигнет центра капли, она превратится в паровой пузырь. В конечном итоге при достаточном притоке теплоты перегретая дисперсная фаза жидкостной эмульсии сменит фазовое состояние на другое, газообразное состояние.

Значимыми переменными, соответствующими структуре физических явлений и входящими в состав модельных соотношений безразмерных критериев, будут теплопроводность паровой фазы, теплота парообразования и теплоемкость дисперсной фазы паровой фазы.



Различные структуры перегретой капли с паровой фазой: а) поверхностная, б) объемная

Другой сценарий теплообмена с участием механизма гомогенной нуклеации представлен на рисунке 6. В этом случае в объеме перегретой капли необходимо наличие достаточного количества потенциальных центров зародышеобразования, таких как твердые микрочастицы или пузырьки газа. Если теплоты достаточно для образования одного или нескольких паровых пузырьков, то их рост требует меньше теплоты и получает приоритет над физическим явлением гетерогенной нуклеации. Жидкость дисперсной фазы более эффективно передает теплоту от сплошной среды к паровой фазе. При наличии достаточного количества теплоты она будет испаряться в паровую среду ядра капли до полного перехода в парообразное состояние.

Значимыми переменными, которые необходимо включать в состав безразмерных критериев, будут теплопроводность диспергированной жидкости, теплота парообразования, теплоемкость дисперсной фазы.

Этими сценариями структура теплообмена даже с низкокипящими каплями далеко не исчерпывается. Простой тепловой баланс для каждого из них позволяет выявить состав безразмерных критериев. Но межфазная поверхность является деформируемой средой, и увеличение объема будет трансформироваться в движение поверхности, увеличивая диаметры парожидкостных капелек и площадь межфазной поверхности. Полного кризиса кипения у твердой поверхности нагрева не будет, поскольку перегретый пар будет локализован в каплях дисперсной фазы. Если притока теплоты недостаточно для превращения капелек жидкости в паровые пузыри, процесс может остановиться на промежуточной стадии и принять квазиустановившийся колебательный характер. В результате сложившего в условиях каждой структуры теплообменных процессов объема и размера парожидкостных агрегатов формируются различные гидродинамические формы потока эмульсии.

Заключение

Необходимость более глубокой детализации сложных термогидродинамических процессов с фазовыми превращениями существенно ограничивает практическое использование пакетов прикладных программ на основе моделей в рамках формализованных CFD-кодов. Элементарные физические явления наглядно представляют структуру

сложных процессов теплообмена в потоке эмульсии с фазовыми превращениями. Они позволяют сузить круг физико-химических, теплофизических и геометрических факторов. Кроме того, детализация на основе реальных особенностей физических явлений адаптирует общие алгоритмы стандартных пакетов программ к разнообразным реальным условиям.

Список литературы

1. Розенцвайг А.К., Страшинский Ч.С. Механизмы вскипания эмульсии с низкокипящей дисперсной фазой в однородном турбулентном потоке // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83. № 3. С. 461–469.
2. Rozentsvaig A.K., Strashinskii Ch.S. Modeling of Complex Processes in Turbulent Flow of Unstable Emulsions of Immiscible Liquids. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2017. vol. 61(3). P. 216–226.
3. Kékesi T., Amberg G., Prah Wittberg L. Drop deformation and breakup. *Int. J. Multiph. Flow*. 2014. vol. 66. P. 1–10.
4. Razzghi K., Shahraki F. Theoretical model for multiple breakups of fluid particles in turbulent flow field. *AIChE Journal*. 2016. vol. 62. P. 4508–4525.
5. Розенцвайг А.К. Движение концентрированных эмульсий с неравновесной дисперсной фазой по трубопроводам в турбулентном режиме // Инженерно-физический журнал. 1982. Т. 42. № 3. С. 366–372.
6. Maruda R., Krolczyk G., Feldshtein E., Pusavec F., Szydowski M., Legutko S., Sobczak-Kupiec A. A study on droplets sizes, their distribution and heat exchange for minimum quantity cooling lubrication (MQCL). *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2016. vol. 100. P. 81–92.
7. Shadakofsky B.M., Kulacki F.A. Boiling of dilute emulsions. Mechanisms and applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. vol. 141. P. 1252–1271.
8. Розенцвайг А.К. Формирование энергосберегающих структур при проектировании процессов переноса и оптимизации их режимных параметров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. № 7–8. С. 58–67.
9. Shishkova I.N., Kryukov A.P., Levashov V.Yu. Vapour-liquid jointed solution for the evaporation–condensation problem. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. vol. 141. P. 9–19.
10. Misyura S.Y. Free Solution Convection at Non-Isothermal Evaporation of Aqueous Salt Solution on a Micro-Structured Wall. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*. 2019. vol. 23 (1). P. 48–66.
11. Rozentsvaig A.K., Strashinskii Ch.S. Model of the Heat Exchange in Boiling Emulsions with Low-Boiling Disperse Phase at the Solid Wall. *Contemporary Engineering Sciences*. 2014. vol. 7(20). P. 965–971.
12. Yamasaki Y., Kita Sh., Iwata K., Shinmoto Y., Ohta H. Heat transfer in boiling of immiscible mixtures. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2015. vol. 3 (1). P. 19–39.
13. Puli U., Kumar R.A. Parametric effect of pressure on bubble size distribution in subcooled flow boiling of water in a horizontal annulus. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2012. vol. 37. P. 164–170.
14. Mory H. Configuration of gas-liquid two-phase bubbles immiscible liquid media. *Int. J. Multiph. Flow*. 1978. vol. 4. P. 383–396.
15. Sazhin S.S., Heikal M.R. Droplet heating and evaporation – recent results and unsolved problems. *Comput. Therm. Sci.* 2012. vol. 4(6). P. 485–496.