

УДК 004.9:620.93:532.517.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЖИДКОСТНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Розенцвайг А.К.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт (филиал),
Набережные Челны, e-mail: a_k_r@mail.ru*

Работа посвящена вопросам математического моделирования сложного теплообмена в жидкостных эмульсиях с активной дисперсной фазой, которая способна испытывать фазовые превращения. При отсутствии полной аналитической модели и большого числа размерных переменных существует разрыв между математическими моделями сложных физических явлений и экспериментальными данными реальных процессов, необходимо находить компромиссные решения, который могут объединить возможности всех имеющихся подходов. В качестве обобщающих модельных структур использованы безразмерные критерии подобия, представляющие механизмы теплофизических явлений переноса. Рассмотрен качественный анализ особенностей предметной области на основе априорного представления для адекватного модельного представления реальных процессов. Основное внимание уделено взаимосвязи гидродинамических, тепловых и кинетических явлений, которые используются во многих технологических процессах для осуществления необходимых физико-химических превращений в объеме дисперсной фазы. Предложена методика обоснования состава обобщенной критериальной модели, которая согласована со спецификациями проектируемого технологического процесса и с качеством конечного продукта. Рассмотрены методические особенности обеспечения целевых математических моделей при моделировании поведения жидкостных эмульсий с фазовыми превращениями в турбулентном потоке в неизотермических условиях. Результаты анализа использованы для моделирования сложного теплообмена при движении в турбулентном режиме жидкостной эмульсии с фазовыми превращениями дисперсной фазы.

Ключевые слова: жидкостная эмульсия, сложный теплообмен, кипение, турбулентность, математическая модель, механизмы физических явлений, критерии подобия, структура

SIMULATION OF THE COMPLEX HEAT EXCHANGE STRUCTURE IN LIQUID EMULSION

Rozenzsvayg A.K.

*Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny (Branch) Institute,
Naberezhnye Chelny, e-mail: a_k_r@mail.ru*

The work is devoted to the issues of mathematical modeling of complex heat transfer in liquid emulsions with an active dispersed phase, which is capable of experiencing phase transformations. In the absence of a complete analytical model and a large number of dimensional variables, the existing gap between mathematical models of complex physical phenomena and experimental data of real processes, it is necessary to find compromise solutions that can combine the capabilities of all available approaches. Dimensionless similarity criteria representing the mechanisms of thermophysical transport phenomena are used as generalizing model structures. A qualitative analysis of the features of the subject area based on a priori representation for an adequate model representation of real processes is considered. The main attention is paid to the interrelation of hydrodynamic, thermal and kinetic phenomena, which are used in many technological processes to carry out the necessary physicochemical transformations in the volume of the dispersed phase. A method is proposed for substantiating the composition of a generalized criterion model, which is consistent with the specifications of the designed technological process and with the quality of the final product. Methodological features of providing target mathematical models for modeling the behavior of liquid emulsions with phase transformations in a turbulent flow under non-isothermal conditions are considered. The results of the analysis are used to simulate complex heat transfer during turbulent motion of a liquid emulsion with phase transformations of the dispersed phase.

Keywords: liquid emulsion, complex heat transfer, boiling, turbulence, mathematical model, mechanisms of physical phenomena, similarity criteria, structure

Технологические процессы в самых разнообразных отраслях производства используют жидкостные эмульсии. Далеко не полный перечень их включает такие важные области экономики, как пищевая и фармацевтическая, а также нефтяная, нефтехимическая и химическая отрасли промышленности. Механизмы физических, кинетических и химических процессов, которые используются для получения конечных продуктов заданного состава и качества, предопределяются конструктивными

и технологическими характеристиками используемого промышленного оборудования. Поэтому при проектировании производственных процессов с использованием жидкостных эмульсий в качестве рабочих сред, а затем для управления и контроля технологических параметров необходимы специализированные средства программного и технического компьютерного обеспечения. Специализация программного обеспечения связана не только со спецификой производства в различных отраслях

промышленности. Необходимость в ней главным образом вызвана сложным и неоднозначным характером алгоритмов, которые моделируют поведение жидкостных эмульсий в различном оборудовании с применением различных технологических приемов, связанных со спецификой производства. Так для достижения необходимых условий для завершения переработки сырья в продукты заданного качества часто используют отстаивание, перемешивание, подогрев, фазовые превращения, обработку реагентами. Режимы и параметры этих процессов во многом зависят от технологических, но и от физико-химических, теплофизических, реологических и параметров несмешивающихся жидкостей и структурных характеристик их смесей. Также усложняет формализацию математических моделей совмещение двух и более процессов, которое используется для снижения производственных затрат и энергопотребления [1, 2].

Одной из нерешенных проблем моделирования процессов с использованием жидкостных эмульсий является сложная взаимосвязь всех технологических приемов с гидродинамическими параметрами. Из них наиболее востребованной является связь гидродинамики и теплообмена. Подробно изучены турбулентный перенос тепла в однородных и неоднородных средах при сложных граничных условиях, гидродинамические закономерности теплообмена при кипении и конденсации в однородных жидкостях [3]. Однако структура коэффициента гетерогенного теплообмена в жидкостной эмульсии с учетом взаимодействия активной (с учетом кипения и фазовых превращений) дисперсной фазы и сплошной среды изучена недостаточно. Описание механизмов физических процессов, необходимое для построения замкнутых математических моделей в таких условиях, становится чрезвычайно сложным даже для формулировки их состава и структуры. Дальнейшее изложение ограничено рассмотрением целевых моделей, отражающих заданные особенности предметной области и показатели качества продукции.

Цель исследования: обобщение математических моделей при моделировании гетерогенного теплообмена в неизотермическом турбулентном потоке эмульсии; методика обоснования в обобщенных моделях состава безразмерных критериев, которые представляют характерные особенности предметной области; использование механизмов элементарных физических явлений для выбора структурных элементов математических моделей.

Обоснование модельных уравнений основано на законах природы является самым полным объяснением существа физических явлений и успешного применения полученных решений для совершенствования технологических процессов. Однако во многих практических случаях такая задача является чрезвычайно сложной для аналитического описания, которое учитывает все специфические особенности предметной области. С другой стороны, наиболее информативные данные экспериментальных исследований нельзя интерпретировать без адекватных представлений относительно механизмов физических процессов [4]. Для преодоления существующего разрыва между математическими моделями сложных физических явлений и экспериментальными данными реальных технологических процессов необходим компромиссный подход, который сможет объединить все их конструктивные средства моделирования.

Модели на основе механики сплошных сред. Классическая модель конвективного теплообмена представляет собой систему пяти гидродинамических уравнений сохранения объема, импульса и объема однородной жидкости. При формулировке их принято считать, что вязкий тензор напряжений – часть потока импульса, которая связана с непосредственным переносом импульса вместе с перемещающейся жидкостью, – зависит от градиентов скорости линейным образом [5]. В основу этой модели заложены ясные теоретические представления относительно характера физических процессов переноса в однородной жидкости. Эти представления дают возможность установить соответствие безразмерных критериев и всех механизмов фундаментальных (элементарных) физических явлений. Важная роль этих критериев состоит в адекватной интерпретации данных экспериментальных исследований и обоснования состава эмпирических модельных зависимостей, отражающих физическое содержание изучаемых реальных процессов. Однако практическое применение такого подхода ограничено допущениями относительно сплошности вязкой жидкости, характера диссипации энергии и теплопроводности в случае многофазных сред, в частности жидкостных эмульсий.

Примером преодоления сложностей теоретического анализа, возникающих даже при приближенном решении нелинейной задачи теплопроводности в однородной жидкости, может служить работа [6]. Метод интеграла теплового баланса с использованием параболического профиля расширяет

возможности теоретического анализа сложного явления. Однако такие ограничения, как неопределенный показатель степени, степенной коэффициент теплопроводности и граничное условие, усложняют практическое применение результата.

Термо-гидродинамика двухфазных течений иллюстрирует важность двухфазных течений в различных инженерных технологиях, когда жидкости преобразуют через фазовые превращения свои свойства и структуру. Двухфазный поток оказывается на порядок сложнее, чем однофазный поток, в связи с наличием движущейся и деформируемой межфазной поверхности и ее взаимодействия с двумя фазами. Более общие двухфазные принципы отражают тенденции, когда теория и эксперимент рассматриваются двуединым явлением, т.е. как основополагающим и как тем, что проявляет себя в реальности [7]. Важным обобщением служат модели межфазного переноса импульса, потому что в большинстве двухфазных потоков преобладают межфазные структуры и межфазный перенос импульса. Составляющие межфазного переноса сильно зависят от площади и локальных механизмов переноса, таких как степень турбулентности вблизи межфазной поверхности и движущие силы. Движущие силы межфазного переноса характеризуются локальными механизмами переноса, которые моделируются отдельными соотношениями. Площадь межфазной поверхности характеризует также кинетические эффекты, связанные со структурой двухфазного потока.

Методы теории подобия. Целевое использование физических представлений для анализа сложных механизмов теплообмена на основе критериев подобия является альтернативой отсутствию общих теоретических моделей. Феноменологический способ получения безразмерных критериев полезен, когда отсутствует модель физического процесса в форме системы исходных уравнений и условий единственности решения. Разновидность теории подобия – метод характеристических масштабов используется для анализа связи исходных физических представлений с конечными результатами моделирования. Частные модели, представляющие характерные особенности предметной области, позволяют установить, какие критерии подобия отражают существо сложного физического явления. Конкретная структура критериев подобия определяется постановкой задачи и сопоставлением с данными экспериментальных исследований [8].

Структура сложного теплообмена в многофазных средах. Адекватные физиче-

ские представления, которые использованы при построении математической модели, являются важным средством интерпретации полученных результатов и обобщения данных экспериментальных исследований сложных теплофизических процессов. Так, большой прогресс отмечен в развитии модели нагрева и испарения капель топлива. Однако ряд вопросов все еще остается без ответа. При моделировании нагрева и испарения капли топлива в реальных условиях необходимы модели, описывающие поведение многокомпонентных капель. Кинетические и молекулярно-динамические модели неизбежно слишком сложны для практического применения в инженерных задачах. Гидродинамические модели испарения капель практически повсеместно используются в инженерных приложениях, но их фундамент еще не получил строгих доказательств и обоснований. В итоге большинство этих моделей остаются довольно сложными, что ограничивает их широкое применение в кодах CFD Сажин [9, 10].

*Феноменологические модели
на основе взаимосвязанных элементарных
теплофизических явлений*

Предлагаемая методология моделирования рассматривается на примере сложного теплообмена в турбулентном потоке жидкостной эмульсии с активной дисперсной фазой, которая в процессе парообразования и/или конденсации при определенном перегреве способна испытывать фазовые превращения. В отличие от кипения у твердой поверхности нагрева парообразование внутри капель дисперсной фазы не приводит к теплофизическому кризисному явлению, связанному с образованием паровой пленки с низкой теплопроводностью. Исключается и другое кризисное явление, гидродинамическое, которое свойственно двухфазным газожидкостным потокам и связано с образованием пробок паровой сжимаемой фазы. Для этого выбирается режим турбулентного потока, который поддерживает размер кипящих капель на уровне, обеспечивающем взвешенное состояние их в объеме сплошной среды.

Сложности моделирования обусловлены тем, что аналитическое описание такого процесса, учитывающего все важные кинетические процессы и особенности совместного движения двух жидкостных и одной паровой фаз, не представляется возможным. Для метода теории подобия проблему представляет большое количество значимых размерных факторов. И это не только теплофизические и гидродинамические характеристики для трех сред. Некоторые из них,

в частности температура, проявляют себя и в разных ипостасях. Кроме температуры нагрева, температуры насыщенных паров, для характеристики интенсивности кипения теплообмена определяют температурный напор $\Delta T = T_{\text{среды}} - T_{\text{sat}}$ и градиенты температуры по пространственным переменным, определяющие движущие силы переноса теплоты. Только на основе априорных физических представлений можно ограничить число значимых для рассматриваемого процесса конвективного теплообмена переменных. Для этого используют механизмы элементарных физических явлений, которые выделяют и группируют их в форме безразмерных критериев подобия [4].

Следует отметить, что другая форма безразмерных величин – симплексов, полученных соотношением одной и той же размерной физической переменной, не отражает существа механизма какого-то физического явления. Более того, такие величины могут оказаться в составе нескольких различных критериев подобия. Объединение в одном показателе означает одинаковое влияние их на результаты модельных расчетов. Но в таком случае неадекватность модельных представлений ведет к ошибочной интерпретации экспериментальных данных и поведения сложного физического явления.

Трансформация дисперсной фазы в неизоатермическом турбулентном потоке. При движении неустойчивой жидкостной эмульсии по трубопроводам в турбулентном режиме капли однородной (пассивной) дисперсной фазы могут принимать участие в кинетических процессах коалесценции, дробления и седиментации. Кинетические процессы используются во многих технологических процессах для осуществления необходимых физико-химических превращений в объеме дисперсной фазы с последующим разделением эмульсии и отделением конечного продукта. Механизмы каждого из этих процессов химической технологии достаточно хорошо изучены, но они взаимосвязаны и взаимодействуют с гидродинамическими процессами достаточно сложным образом. На практике эти процессы можно контролировать и исключать при необходимости. Так, коалесценцию можно исключить стабилизацией эмульсии с помощью поверхностно-активных веществ, дробление и седиментацию – выбором соответствующего распределения капель по размерам в исходной эмульсии [1, 4]. Однако активная дисперсная фаза в процессе кипения значительно изменяет объем, и это необходимо учитывать при моделировании конвективного теплообмена.

Механизмы инициированного кипения перегретой дисперсной фазы эмульсии. Влияние гидродинамических процессов на механизмы переноса теплоты в жидкости происходит из-за сильной турбулизации, обусловленной взаимодействием ее с пузырьками паровой фазы. В условиях пузырькового кипения у твердой поверхности нагрева отделение пузырьков пара и их движении в пристенном слое возникают возмущения перегретой жидкости. Они интенсифицируют явления переноса теплоты под влиянием вынужденного движения жидкости и парообразования в ней [8]. В турбулентном потоке эмульсии гидродинамическое влияние на кипение капель дисперсной фазы изучено гораздо меньше и носит более сложный многоплановый характер [11, 12]. В обычных условиях парообразование начинается при температуре, превышающей температуру насыщенных паров диспергированной жидкости $T_{d,sat}$. Однако она ограничена межфазной поверхностью, которая способна передавать наряду с тепловой энергией энергию турбулентности сплошной среды. При этом сама граница раздела способна испытывать локальные деформации, аналогичные шероховатостям на твердой поверхности нагрева. Таким образом, энергия турбулентности интенсифицирует формирование внутри низкоккипящих капель активных центров образования зародышей паровой фазы. Рост пузырьков пара вызывает не только возмущения в объеме диспергированной жидкости, но и вынужденные пульсационные движения деформируемой межфазной поверхности. В свою очередь, турбулентные пульсации сплошной среды вступают во взаимодействие с пульсациями поверхности капель, которое в зависимости от их масштабов может носить динамический или вязкий характер. В результате в эмульсии могут актуализировать кинетические процессы.

Такие качественные априорные представления о сложных тепло-гидродинамических процессах дают возможность оценивать перспективные возможности различных проектных вариантов технологических процессов. Кроме того, исключаются сложности при формулировке моделей конвективного теплообмена в общей форме и можно ограничиться частными спецификациями исходя из условий предметной области.

Частные математические модели теплообмена в гетерогенной среде. В турбулентном потоке эмульсии с недогретой сплошной средой пульсации скорости интенсифицируют теплообмен с низкоккипящими каплями дисперсной фазы. Пульса-

ционные движения поверхности капель могут усиливаться в результате резонанса при совпадении с турбулентными пульсациями и создавать благоприятные условия для парообразования в объеме перегретой диспергированной жидкости. Подобные явления формируют сложный теплообмен, результат структурных составляющих которого не подлежат простому суммированию, поскольку они взаимосвязаны между собой. Поэтому каждой комбинации элементов теплообмена соответствует нестандартная критериальная модель, обоснование которой можно выполнять следующим образом.

Обобщенным критерием, характеризующим теплообмен в жидкостной эмульсии с каплями дисперсной фазы, является локальное число Нуссельта, который связывает коэффициенты теплопроводности сплошной среды $\lambda_{L,C}$ и теплопередачи k . Для одиночной капли дисперсной фазы жидкостной эмульсии с диаметром $d_{L,D}$ его записывают как $Nu_{local} = kd_{L,D}/\lambda_{L,C}$, где величина $k = (-\lambda_{L,C} \partial T / \partial n) / \Delta T_{C,D}$ определена только для поверхности такой капли, а $\Delta T_{C,D} = T_C - T_D$ – разность температур между несмешивающимися жидкостями, представляющими дисперсную фазу и сплошную среду эмульсии.

Для учета концентрации дисперсной фазы обобщенный коэффициент теплопередачи $k_{overall}$ для теплового потока относительно площади всей межфазной поверхности в единице объема эмульсии $SD_{interface}$ записывается как $k_{overall} = (-\lambda_C \partial T / \partial n) / \Delta T_{C,D} = Q / (SD_{interface} \Delta T_{C,D})$.

Глобальное число Нуссельта представляет осредненное значение локального числа

$$Nu = k_{overall} d_D / \lambda_{L,C} = Q d_D / (SD_{interface} \Delta T_{C,D} \lambda_{L,C}). \quad (1)$$

Для приближенного описания закономерностей двухфазных турбулентных течений обычно используют критериальное соотношение [13]:

$$Nu = C Re^{0,8} Pr^{0,4}. \quad (2)$$

Моделирование неизоэнтальпического процесса парообразования в дисперсной фазе эмульсии связано с представлением в явном виде структуры переноса теплоты, которая определяется механизмами элементарных физических явлений. В отсутствие полной аналитической модели и большого числа размерных переменных безразмерные критерии можно получить с помощью соотношений одноименных показателей процессов переноса, которые полагаются определяющими для моделируемого теплофизического процесса. Очевидно, как сами

критерии, так и переменные, входящие в их состав, predetermined физическим содержанием реальных явлений. Так для учета некоторых особенностей кипения в объеме капель дисперсной фазы обобщением этого критериального соотношения может служить [14]:

$$Nu = C Re^{\alpha(boil)} Ja^{\beta}. \quad (3)$$

Дробление, нагрев и испарение при сжигании в двигателях жидких смесей связаны с газожидкостными течениями, когда парообразование происходит с межфазной поверхности в сплошную среду. Поэтому возможны прямые наблюдения и измерения параметров сложных теплообменных процессов в каплях топливной эмульсии. Это упрощает идентификацию состава физических явлений [15]. В жидкостной эмульсии визуализация реальной картины кипения внутри капель затруднена и возможно только использование опосредованных данных. Разнообразие параметров и режимов течения представляет большое число критериев, соответствующих характеру процессов.

Наиболее общим способом обоснования критериев являются безразмерные отношения энергетических и механических характеристик тепловых и гидродинамических физических явлений. Обычно критерий Рейнольдса Re характеризует соотношение динамических сил скоростного напора и вязкостных сил в потоке однородной жидкости. Он используется для характеристики течения стабильной эмульсии с пассивной дисперсной фазой. Однако для характеристики движения межфазной поверхности, связанного с образованием и ростом паровой фазы, этот критерий использует другие размерные переменные: так в качестве скорости появляется характеристика интенсивности кипения u_{boil} . Критерий Якоба Ja характеризует интенсивность парообразования соотношением теплоты $c_p \rho_d \Delta T$, полученной дисперсной фазой от сплошной среды к теплоте r_p , затраченной на испарение. В эмульсии он может использовать характеристики жидкости и дисперсной фазы или сплошной среды, что зависит от того, какая из них раньше достигнет температуры насыщенных паров.

Критерий Прандтля Pr в однородной жидкости характеризует отношение теплового потока, обусловленного работой сил трения, к конвективному тепловому потоку. Он также может относиться в эмульсии с активной дисперсной фазой к одной из двух жидкостей или паровой фазе в зависимости от характера моделируемого технологического процесса. Такие менее распространенные критерии, как число Ве-

бера We , число кипения Bo , число Эккерта Ec , также характеризуют важные особенности конвективного теплообмена в определенных условиях. Исходя из физических соображений, все они могут иметь основания для рассмотрения и включения в состав обобщенной критериальной зависимости, аналогичной соотношениям (2) и (3).

Таким образом, исходя из качественных физических представлений, в модельную зависимость включаются критерии, соответствующие характеру проектируемого технологического процесса. Приемлемость формы нелинейной критериальной взаимосвязи и ее эмпирические константы оцениваются на основе имеющейся априорной информации или данных экспериментального исследования процесса теплообмена в реальных условиях [1, 3].

Заключение

Математические модели физических явлений в нестандартных условиях, которые обоснованы адекватными физическими представлениями, способствуют результативной интерпретации и обобщению данных экспериментальных исследований сложных теплофизических процессов. Однако для этого необходимо соответствие структуры модели процесса и структуры физического процесса. Формально применять общие модели, в которых процессы не детализированы до уровня элементарных физических явлений, гораздо сложнее, чем решать обратную задачу – формировать целевую критериальную модель, представляющую взаимодействия элементарных явлений проектируемого технологического процесса.

Список литературы

1. Розенцвайг А.К. Энергосберегающие структуры процессов переноса в дисперсных системах. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016. 325 с.
2. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Башаров М.М., Николаева Л.А., Лаптедутьче Н.К., Шинкевич Е.О., Сергеева Е.С., Демидова Ю.М., Бородай Е.Н., Долгов А.Н., Фарахов М.М., Сафина Г.Г. Энерго- и ресурсосберегающие технологии и аппараты очистки жидкостей в нефтехимии и энергетике. Казань: Отечество, 2012. 410 с.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
4. 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.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 736 с.
6. Hristov J. An approximate analytical (integral-balance) solution to a non-linear heat diffusion equation. Thermal science. 2015. vol. 19 (2). P. 723–733.
7. Ishii M., Hibiki T. Thermo-fluid dynamics of two-phase flow. NY: Springer Science + Business Media LLC. 2011. 527 p.
8. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. М.: Высшая школа, 1974. 328 с.
9. Sazhin S.S., Krutitskii P.A., Gusev I.G., Heikal M.R. Transient heating of an evaporating droplet with presumed time evolution of its radius, Int. Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. vol. 54. P. 1278–1288.
10. Sazhin S.S., Al Qubeissi M., Xie J.-F. Two approaches to modelling the heating of evaporating droplets. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2014. vol. 57. P. 353–356.
11. 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.
12. Rozentsvaig A., Strashinskii Ch. Hydrodynamic aspects of boiling up of a disperse phase in a homogeneous turbulent flow of an emulsion. High Temperature. 2011. vol. 49. P. 143–146.
13. Labuntsov D.A. Physical principles of energy. Selected works on heat transfer, fluid mechanics, thermodynamics. Publisher MEI Moscow. 2000. 381 p. (in Russian).
14. Rozentsvaig A. and Strashinskii Ch. Influence of the structure of vapor-liquid drops on heat exchange in boiling of emulsions of immiscible liquids. JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. vol. 16 (2). P. 341–349.
15. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions. International Journal of Thermal Sciences. 2019. vol. 142. P. 30–41.