

УДК 665.3/536.24/532.5

Взаимное влияние гидродинамических условий и фазовых переходов при кипении многокомпонентных вязких жидкостей

Канд. хим. наук **С.М. Волков**¹, д-р техн. наук **А.В. Федоров**^{1,2}, afedorov@ifmo.ru
 канд. техн. наук **Е.В. Тамбулатова**², д-р техн. наук **А.Г. Новоселов**²,
 д-р техн. наук **О.Б. Цветков**², д-р техн. наук **И.А. Фридман**^{1,3}, **А.А. Федоров**²

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт жиров
 191119, Россия, Санкт-Петербург, ул. Черныховского, 10*

² *Университет ИТМО
 191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

³ *Санкт-Петербургский химико-фармацевтический университет
 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 14.*

В работе представлены результаты исследований интенсивности тепломассопереноса при кипении вязких жидкостей в обогреваемом канале на примере дистилляции мисцеллы растительного масла. Впервые получены локальные характеристики теплоотдачи по длине канала для мисцеллы, содержащей подсолнечное масло линолевого типа, при этом значения коэффициентов теплоотдачи составляют 100–250 Вт/м²·К. Дано описание и анализ механизма переноса массы и энергии в активной рабочей зоне обогреваемого канала. Обоснован выбор длины канала диаметром 30 мм в зависимости от входной массовой концентрации растительного масла в мисцелле: до 60–70% не более 1500–2000 мм, выше 60–70% до 4000–6000 мм. Проведено экспериментальное исследование формирования маслообогащенного слоя в мисцелле у обогреваемой поверхности. Предполагается, что его толщина может составлять 0,3–0,4 мкм. На основе полученных данных предложена простая формула для расчета толщины этого слоя. Установлена связь между гидродинамической обстановкой и интенсивностью теплообмена по длине канала, наилучшим является пузырьковый режим течения двухфазного потока.

Ключевые слова: вязкие жидкости; растительное масло; дистилляция мисцеллы; тепломассообмен; гидродинамика.

DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-4-29-38

Mutual influence of hydrodynamic conditions and phase transitions during boiling of multicomponent viscous liquids

Ph. D. **Sergey M. Volkov**¹, D. Sc. **Alexander V. Fedorov**^{1,2}, afedorov@ifmo.ru
 Ph. D. **Ekaterina V. Tambulatova**², D. Sc. **Alexander G. Novoselov**²,
 D. Sc. **Oleg B. Tsvetkov**², D. Sc. **Ilya A. Fridman**^{1,3}, **Alexey A. Fedorov**²

¹ *All-Russian research Institute of fats
 10, Chernyakhovsky str., St. Petersburg, 191119, Russia*

² *ITMO University
 9, Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia*

³ *St. Petersburg Chemical and Pharmaceutical University
 14, lit. A, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russia*

The paper presents results on the intensity of heat and mass transfer during boiling of viscous liquids in a heated channel on the example of distillation of vegetable oil miscella. For the first time, local characteristics of heat transfer along the channel length were obtained for miscella containing linoleic sunflower oil. The values of the heat transfer coefficients are 100–250 W/m²·K. The mechanism of mass and energy transfer in the active working zone of the heated channel is described. The choice of the channel length with a diameter of 30 mm depending on the input mass concentration of vegetable oil in the miscella is justified: up to 60–70% no more than 1500–2000 mm, above 60–70% up to 4000–6000 mm. An experimental study of the formation in miscella of an oil-rich layer near heated surface is carried out. We think the thickness may be 0.3–0.4 microns. Dependences are obtained and a simple formula for calculating the thickness of this layer is proposed. The relationship between the hydrodynamic environment and the intensity of heat exchange along the length of the channel is established. The best mode is the bubble mode of the two-phase flow.

Keywords: viscous liquids; vegetable oil; distillation of the miscella; heat and mass transfer; hydrodynamics.

Введение

В пищевой промышленности при реализации современных технологических процессов есть вопросы повышения эффективности работы оборудования для тепловой обработки жидкостей, имеющих высокую вязкость. Это различные сиропы, экстракты, смеси, эмульсии, масла, растворы. Наиболее сложные задачи стоят тогда, когда процесс теплового воздействия проводится с фазовым переходом. Это подогрев, выпаривание, дистилляция, ректификация, перегонка, кипячение, сгущение. В промышленном производстве при обработке больших объемов продуктов и полуфабрикатов преобладают непрерывные тепловые процессы, которые большей частью реализуются в теплообменных аппаратах с каналами. Обработываемая среда движется, как правило, внутри каналов.

Интенсификация процессов тепловой обработки вязких жидкостей достигается различными способами. Среди них формирование наилучшей гидродинамической обстановки выглядит предпочтительно, так как требует наименьших материальных затрат. Однако этот метод достаточно сложно реализовывать в крупномасштабном производстве, так как гидродинамические характеристики потока внутри оборудования чувствительны к изменению входных параметров и свойств обрабатываемой жидкости. Изменения реологических и теплофизических свойств жидкой и газовой фаз, а также их взаимодействие, существенно усложняют теоретические построения моделей теплопереноса.

Как показывает обзор научных источников, интерес к рассматриваемой проблеме не ослабевает. Есть такие фундаментальные классические труды, как [1], где закреплен опыт исследований по широкому кругу задач. Опубликованы работы, имеющие конкретную направленность, например, изучение теплоотдачи от нагретых поверхностей к вязким жидкостям, таким как водоглицериновые растворы [2]. Оригинальные данные представлены в исследовании [3] по теплопередаче при влиянии лучистой составляющей, которая играет особо заметную роль при пленочном кипении у твердой поверхности. Некоторые авторы более подробно и успешно изучают волновые эффекты на границах раздела фаз и у твердой поверхности [4]. Современный подход к решению задач в сложных средах, с учетом особенностей обстановки в пограничной (пристенной) области, предложен авторами [5, 6].

В последнее время появились новые интересные исследования по теплообмену в технологиях масложирового комплекса. Публикация [7] посвящена теплопередаче в растительном масле при гидрировании. Есть ряд работ по использованию растительных масел и продуктов переработки в других отраслях промышленности, например, машиностроении, металлургии и металлообработке [8, 9]. Данные, опубликованные в этих работах, могут быть полезны и в расчетах при создании технологий маслосодобывания. В монографии [10] есть отдельные разделы по тепловой обработке масличного материала и растительных масел. Однако, можно сделать вывод, что теме изучения процессов переноса массы и энергии в тепловых процессах в масложировом производстве все же уделяется недостаточно внимания. Это в первую очередь касается новых масличных материалов, поступающих в промышленную переработку. Например, новые сорта подсолнечника у которых жирнокислотный состав масла отличается от традиционного, например линолевого типа.

Основной промышленной технологией производства растительных масел является экстракционный способ. В результате экстрагирования растительного масла из масличного материала получается раствор. Этот раствор называется мисцеллой, и он состоит из растительного масла и органического растворителя. На большинстве предприятий в России применяется растворитель типа нефрас, основой которого является н-гексан. Процесс разделения растворителя и растительного масла называют дистилляцией мисцеллы. Осуществляется он посредством перевода растворителя в газообразное состояние при интенсивном подводе тепловой энергии.

К этому этапу в технологии маслосодобывания привлечено повышенное внимание. Во-первых, это самая энергоемкая стадия во всем технологическом цикле производства. Во-вторых, из-за термолабильности растительных жиров при интенсивном тепловом воздействии может быть нанесен непоправимый ущерб качеству готового продукта. Тепловое воздействие характеризуется повышенной температурой продукта в объеме и на греющей поверхности, и временем пребывания его в активной зоне. Именно излишнее время пребывания даже небольших порций масла в зоне повышенных температур приводит к негативным последствиям на выходе. В-третьих, появление в промышленной переработке масел с новыми составами требует уточнения и совершенствования применяемых методик расчета параметров теплообмена. В-четвертых, это один из наиболее взрывопожароопасных процессов в технологии производства

растительных масел, и поэтому правильное понимание механизма энергооборота важно для предотвращения локальных перегревов, «взрывных» неконтролируемых «вскипаний» и иных опасных явлений.

Подробное исследование интенсивности теплоотдачи при дистилляции мисцеллы способствует более глубокому пониманию физических и физико-химических процессов и явлений. Открываются возможности для более точных расчетов теплообменного оборудования и рационального построения технологических процессов, что в свою очередь позволяет снижать энергозатраты на производство и улучшать качество готового продукта – растительного масла.

Необходимость получения новых экспериментальных исследований вызвана недостатком информации для построения моделей процессов, особенно новых сортов растительных масел. В связи с этим целью данного исследования являлось установление взаимосвязи между теплообменными и гидродинамическими характеристиками при кипении мисцелл внутри обогреваемых каналов. Рассматривался процесс удаления растворителя из мисцеллы на макро- и микроуровне.

Для этого необходимо было решить такие задачи, как получение новых опытных данных по коэффициентам теплоотдачи при кипении мисцеллы в обогреваемом канале; получение данных по формированию маслообогащенного слоя на обогреваемой поверхности; анализ процессов переноса массы и энергии в потоке кипящей мисцеллы.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются тепломассообменные и гидродинамические процессы при кипении масляных мисцелл внутри аппаратов.

В качестве метода исследования нами был выбран эксперимент. Эксперименты можно проводить как на действующем оборудовании, так на специально созданных установках в лабораториях. На реальном промышленном оборудовании можно получить только интегральные характеристики без информации о локальных процессах, поэтому нами были проведены опыты на экспериментальной установке, где воспроизводился процесс дистилляции мисцеллы, максимально приближенный к реальным условиям.

Мисцелла включала подсолнечное масло линолевого типа. Исследования теплообмена проводились параллельно с наблюдением за гидродинамической структурой потока в канале. Так как с ростом концентрации происходит радикальное изменение кинетических свойств жидкой фазы – вязкость, теплопроводность, диффузия, а также резко возрастает температура кипения мисцеллы, изменяется скорость потоков и соотношение расходов фаз, определяющих гидродинамическое состояние, идет постоянное перестроение двухфазного потока и активный тепломассообмен.

Результаты и их обсуждение

1. Эксперименты при кипении мисцеллы в обогреваемом канале.

Эксперименты проводились на специализированном стенде. Впервые такой стенд был создан в лаборатории экстракции ВНИИЖиров под руководством В.В. Ключкина, подробное описание которого приведено в [11, 12]. Стенд был неоднократно модернизирован, но в основном это касалось средств измерений, обработки и передачи информации. Основным элементом стенда являются два обогреваемых вертикальных канала – один из стекла, второй из металла, имеющие одинаковую длину по 4000 мм и внутренние диаметры 30 мм. В процессе эксперимента регистрируется расход жидкости, измеряется температура мисцеллы и теплоносителя по длине канала. Данные, полученные с помощью системы сбора и обработки информации, позволяют вычислять коэффициенты теплоотдачи. Имелась возможность визуального наблюдения за структурой двухфазного потока кипящей жидкости. Исследование выполнено с использованием модельной мисцеллы, состоящей из подсолнечного масла линолевого типа и н-гексана. Жирнокислотный состав растительного масла представлен в таблице.

Таблица. Жирнокислотный состав нерафинированного пищевого растительного масла
 Table. Fatty acid composition of unrefined edible vegetable oil

Название жирной кислоты	Условное обозначение	Нерафинированное подсолнечное масло линолевого типа, %
пальмитиновая	C 16:0	5,7
стеариновая	C 18:0	3,4
олеиновая	C18:1	25,5
линолевая	C 18:2	64,5
линоленовая	C 18:3	–
арахиновая	C 20:0	0,1
гондоиновая	C 20:1	–
бегеновая	C 22:0	0,8

После обработки опытных данных получены локальные коэффициенты теплоотдачи по длине канала в зависимости от таких режимных параметров, как скорость потока, концентрация и температура на входе во взаимосвязи со структурой двухфазного потока. На рисунке 1 представлены результаты в виде зависимостей коэффициентов теплоотдачи по длине канала от массовой концентрации растительного масла в мисцелле на входе.

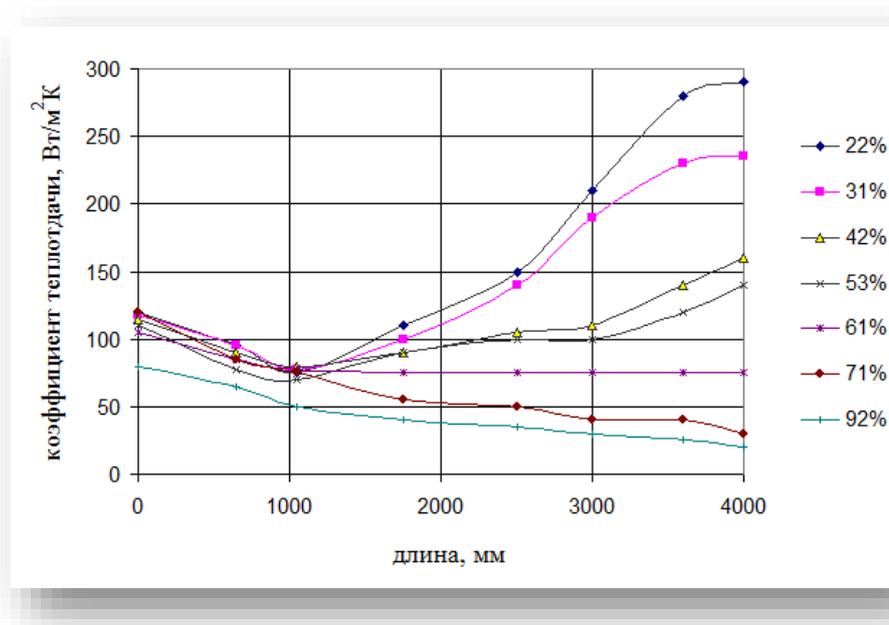


Рисунок 1 – Изменение локальных коэффициентов теплоотдачи по длине канала в зависимости от массовой концентрации мисцеллы на входе

Figure 1. Changes in local heat transfer coefficients along the length of the channel depending on the concentration of miscella at the inlet

Вся длина трубы может быть условно разделена на следующие участки: подогрев; активный рабочий; пассивный. Рассмотрим их подробнее.

Участок подогрева. Для того чтобы максимально эффективно использовать поверхность теплообмена в большинстве технологий маслоэкстракционного производства предусматривается подогрев мисцеллы практически до температуры кипения еще до входа в дистиллятор. Однако, на практике по ряду причин это выполнить сложно, поэтому в наших экспериментах на входе мисцелла имела температуру на 5–8 °С ниже температуры кипения.

Из рисунка 1 видно, что для мисцелл всех концентраций в зоне подогрева наблюдается постепенное снижение коэффициента теплоотдачи по мере движения потока по трубе. Это вполне объяснимо. При попадании в канал жидкость, преодолевая гидравлическое сопротивление, получает возмущение, которое на начальном участке вызывает ее активное перемешивание, что стимулирует тепломассообмен. Затем происходит гидродинамическая стабилизация потока и, соответственно, снижение коэффициента

теплоотдачи. Считается, что на этом участке канала удаления растворителя не происходит, и расход жидкости в канале сохраняется постоянным. Теплообмен осуществляется только за счет однофазной конвекции. Большинство применяемых для расчетов методик основаны на том, что выпаривание наступает только при полном прогреве всей жидкости по сечению до температуры кипения раствора данной концентрации. Однако, это не совсем так. Проведенные нами исследования подтверждают, что в канале идут сложные и неоднозначные гидродинамические процессы с наличием газообразной фазы.

В поперечном сечении поток жидкости можно условно разделить на две области: ядро и пограничный (пристенный) слой. В последнем наблюдается наибольший градиент температур и градиент скоростей движения жидкостных частиц. Температура внутренней поверхности трубы значительно выше температуры кипения раствора, поэтому в результате прогрева отдельных порций мисцеллы на поверхности образуются одиночные пузырьки растворителя, которые отрываются от стенки и уносятся потоком. Этот факт нами установлен. Эффективность нагрева жидкости в результате влияния процессов фазового перехода должна быть выше, чем для однофазного процесса, но с другой стороны, диффузионные процессы препятствуют эффективному подтоку свежей мисцеллы, что заметно уменьшает интенсивность теплообмена.

Существующие методики расчета процессов в участке подогрева однозначно требуют уточнения. Наши предварительные расчеты показывают расхождение до 20–30% даже при использовании надежных формул, применяемых для однофазной конвекции. И это при условии, что имеются достоверные актуальные данные по теплофизическим свойствам исследуемой жидкости. Следует отметить, что таких данных в последнее время появилось достаточно много [12–15].

Наши расчеты показывают, что времени пребывания в зоне повышенных температур у стенки отдельных порций масла вполне достаточно, и можно не без основания предположить, что локальные перегревы масла в мисцелле на начальном участке возможны.

Активный рабочий участок. Вслед за участком подогрева находится рабочий участок, в котором наблюдается двухфазная конвекция с активными фазовыми переходами в потоке. Представленные на рисунке 1 зависимости можно объединить в две группы: мисцеллы средней и малой концентрации (до 60–65%); более концентрированные мисцеллы. В первой группе коэффициент теплоотдачи возрастает по длине канала, а во второй – не увеличивается, и даже уменьшается. Порог концентрации 60–65%, полученный в наших экспериментах, хорошо согласуется с порогом на зависимостях температуры кипения мисцелл от концентрации в работах [14, 15]. На рисунке 2 видно, что при этих концентрациях наблюдается начало резкого возрастания температуры кипения мисцеллы. Авторы [14, 15] показали, что это характерно для большинства растительных масел и растворителей. Установленное соответствие температур, концентраций и интенсивности теплоотдачи открывает возможность дальнейших исследований.

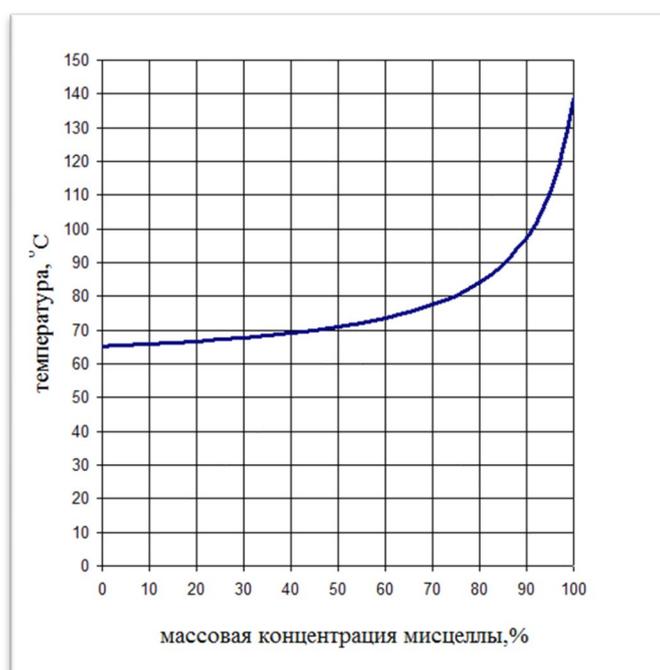


Рисунок 2 – Зависимость нормальной температуры кипения мисцеллы от концентрации [14]
 Figure 2. Dependence of the normal boiling point of miscella on concentration [14]

Считается, что на активном рабочем участке трубы температура обрабатываемого раствора достигает температуры кипения для данной концентрации и уже действуют не отдельные центры парообразования, а происходит активное кипение жидкости на всей поверхности. Здесь прослеживается аналогия с кипением чистых однокомпонентных жидкостей, а именно, кипением с недогревом в трубах. Действительно, концентрация мисцеллы у стенки всегда выше, чем в ядре потока, а значит и температура кипения тоже. Как и при кипении с недогревом, рост пузырьков зависит от парообразования на его поверхности, примыкающей к стенке, и одновременной конденсации на границе задела фаз, омываемой менее нагретым ядром потока. Это определяет существование множества достаточно эффективных так называемых теплопередающих центров. Механизм переноса и профиль температуры условно показан на рисунке 3.

На поверхности теплообмена в местах центров парообразования, которые можно называть «пятнами контакта» или «пятнами высыхания», после отрыва пузырей однозначно остается только масло, которое затем смывается потоком свежей мисцеллы. Даже существующий незначительное время слой масла способствует ухудшению процесса парообразования, так как фактически он является дополнительным существенным тепловым сопротивлением. Одновременно при этом в масле происходят нежелательные локальные перегревы. Степень повреждения масла в целом функционально связана с температурой стенки, температурой ядра потока, вязкостью мисцеллы и масла, коэффициентом поверхностного натяжения мисцеллы, скоростью движения потока.

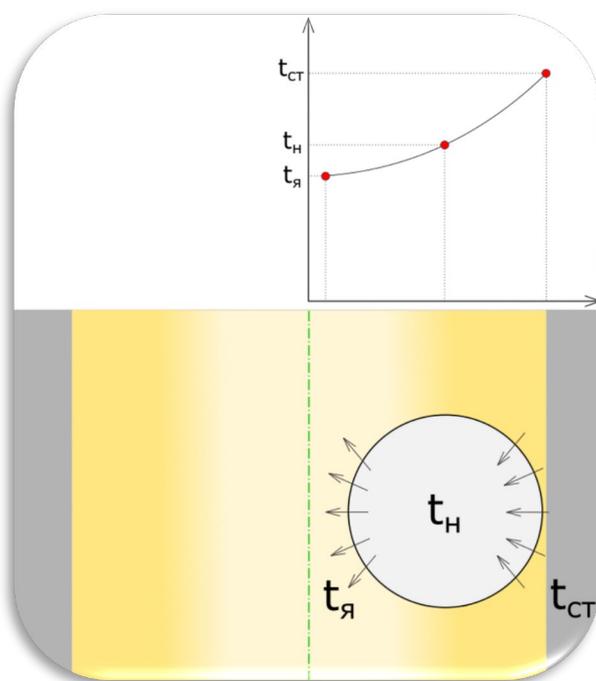


Рисунок 3 – Пузырек между стенкой и ядром потока и распределение температуры по радиусу трубы
 Figure 3. Bubble between the wall and the flow core and the temperature distribution along the pipe radius

На границе раздела самих растущих пузырей образуется маслобогатенный слой. В принципе, в предельном случае его тоже можно рассматривать как растительное масло. Слой этот, безусловно, препятствует процессу испарения растворителя внутрь. Вырвавшись из пограничного слоя оторвавшиеся пузыри попадают как бы в недогретое ядро жидкости. В этой вновь образованной локальной термодинамической системе жидкость–пар происходит обратный процесс – конденсация. При этом теплота конденсации паров растворителя расходуется на нагрев жидкости в ядре потока. Таким образом, возникает некий довольно эффективный механизм, транспортирующий тепловую энергию от стенки в ядро потока. Однако этот механизм работает менее результативно чем в однокомпонентных жидкостях. Не следует забывать, что при образовании пузырьков растворителя у стенки происходит резкое увеличение концентрации жидкости и, как следствие, повышение температуры кипения. Увеличение концентрации жидкости вызывает увеличение вязкости жидкости и, соответственно, изменение теплообменных механизмов. При этом в ядре потока, за счет привнесения некоторого количества растворителя, при конденсации паровых пузырьков происходит, наоборот, уменьшение концентрации. Градиент концентрации

по сечению трубы стимулирует диффузионные процессы, при этом вектора теплообмена и массообмена совпадают.

Совершенно иной механизм кипения мисцеллы начинается с того сечения трубы, где средняя температура в ядре потока становится выше температуры кипения растворителя, то есть прекращается конденсация образовавшихся пузырьков. Проводя аналогию с режимами кипения однокомпонентных жидкостей, наблюдается развитое кипение жидкости или пузырьковое кипение.

Для каждой начальной концентрации наступает такой момент в канале, когда практически прекращается кипение на поверхности трубы за счет повышения локальной концентрации масла. Наблюдается двухфазное пленочное течение потока, но без фазовых переходов – у стенки находится высококонцентрированная мисцелла, а в ядре – газообразный растворитель.

Для мисцелл с входной концентрацией больше 60–65% коэффициент теплоотдачи уменьшается по длине канала как это видно на рисунке 1. Это можно объяснить увеличением вязкости в данном диапазоне концентраций, а следовательно, уменьшением конвективной составляющей, вносящей основной вклад в процесс теплообмена. Подток свежей мисцеллы к поверхности нагрева затруднен. При данном уровне температур снижается интенсивность выпаривания растворителя. Структура потока в основном пенная и пенно-снарядная.

Пассивный участок. Это такой участок трубы, где фактически не происходит выпаривание растворителя. Через него в основном осуществляется транспортировка паров растворителя, образовавшихся ранее в трубе, которые можно условно называть транзитными. Причем этих паров растворителя может быть столько много, что они периодически занимают все сечение и оттесняют мисцеллу от греющей стенки, не давая ей прогреться и закипеть в полной мере. Температура транзитных паров ниже температуры насыщения для верхнего сечения. Возникает неравновесная термодинамическая система, в которой тепловая энергия расходуется и на подогрев транзитных паров. Фактически конечный участок трубы является неактивной зоной и не несет никакой технологической нагрузки, поэтому вполне оправдано называть его пассивным участком. Для него характерно снижение коэффициента теплоотдачи и особенно для высококонцентрированных мисцелл, как это представлено на рисунке 1.

2. Особенности гидродинамических характеристик по длине трубы.

В идеальном случае вся длина трубы должна принадлежать второму участку, на котором производится активное удаление растворителя, но в реальности это не так, границы участков располагались на расстояниях 1200–1500 и 3200–3800 мм от входа трубы соответственно. В опытах мисцелла поступала с одинаковым расходом в металлический и стеклянный канал. Проводилось визуальное наблюдение за процессами через стенку стеклянного канала, изменялась концентрация мисцеллы на входе. При кипении мисцеллы в трубе есть несколько сменяющих друг друга режимов движения двухфазного потока. Эти режимы в основном соответствуют классическим режимам: однофазная конвекция, пузырьковый, пробковый или снарядный. Установлено, что длина участка пузырькового кипения уменьшается с увеличением входной концентрации мисцеллы. В пузырьковом режиме можно условно выделить еще и пенный. Переход от пузырьковой структуры к пенной структуре происходит как бы внезапно. Сразу весь объем по сечению занимает пена. Пенная структура наблюдалась и на следующих участках трубы, даже когда режим течения переходит в так называемый «снарядный». Для малых входных концентраций мисцеллы (менее 30%) в потоке, ближе к верхнему краю трубы, отмечен хаотичный, рваный режим.

3. Эксперименты по изучению формирования маслообогатенного слоя на поверхности нагрева при кипении мисцеллы.

Для исследования истинной природы маслообогатенного слоя вблизи греющей поверхности нами были проведены отдельные эксперименты. В основу метода положено свободное остывание твердого тела в термостабилизированной среде при естественной конвекции. Подробное описание экспериментальной установки представлено в [19]. В качестве образца использовалось та же мисцелла, что и в опытах в трубе.

Было установлено, что толщина маслообогатенного слоя прямо пропорциональна молярной концентрации масла в объеме жидкости. Полученная нами зависимость носит ярко выраженный линейный характер. На рисунке 4 представлены результаты экспериментов и их аппроксимация.

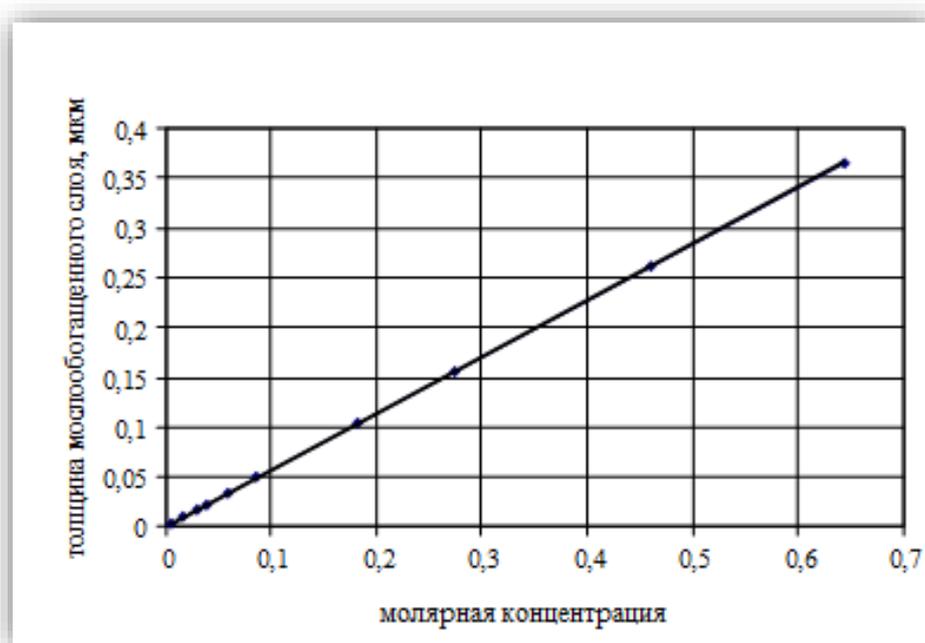


Рисунок 4 – Зависимость толщины маслообогащенного слоя у нагретой стенки от молярной концентрации мисцеллы в объеме жидкости

Figure 4. Dependence of the thickness of the oil-enriched layer at the heated wall on the molar concentration of miscella in the volume of the liquid

Для расчетов предложено простое и удобное соотношение

$$\delta = 0,57 \cdot X_M,$$

где X_M – молярная концентрация масла в мисцелле в объеме жидкости (на удалении от стенки).

Молярная концентрация мисцеллы определяется соотношением

$$X_M = \frac{1}{1 + \frac{M_M(1-C_M)}{M_P C_M}},$$

где M_M, M_P – молярные массы масла и растворителя, кг/кмоль;

C_M – массовая концентрация масла в мисцелле, кг/м³.

Известно, что при наложении двух или более различных по физической природе неравновесных термодинамических процессов однозначно возникает их взаимодействие. В мисцелле, которую можно считать квазидвухкомпонентным раствором, на градиент концентрации накладывается градиент температуры. При этом считаем, что давление в системе величина постоянная. Энергообмен и массообмен в жидкой неоднородной среде подчиняются законам Фурье и Фика, поэтому, в принципе возможна, постановка задачи для совместного решения системы уравнений гидродинамики, массообмена и теплообмена. Полученные нами данные могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

Заключение

1. Установлено, что наиболее рациональным с позиции эффективности процесса удаления растворителя из мисцеллы является пузырьковый режим течения двухфазного потока, характеризуемый коэффициентами теплоотдачи 100–250 Вт/м²·К. Необходимо обеспечивать его максимальную длину в обогреваемом канале реального аппарата.

2. Исследования границ режимов двухфазного потока позволяют дать предварительные рекомендации по выбору длины труб теплообменных аппаратов. Для мисцелл с входной массовой долей масла менее 60–70% длина труб не должна быть свыше 1500–2000 мм. Для мисцелл с входной массовой долей масла более 60–70% могут применяться более длинные трубы – 4000–6000 мм.

3. Толщина маслообогащенного слоя (или даже слоя растительного масла) на поверхности нагрева при кипении прямо пропорциональна концентрации масла в мисцелле и может составлять 0,3–0,4 мкм.

4. Можно сделать определенные выводы о целесообразности интенсификации процессов в каналах при движении вязких многокомпонентных многофазных сред применительно к технологиям

маслодобывания. Наиболее перспективными представляются организация регулируемых двухфазных течений; стимулирование перемешивания потоков обрабатываемого материала посредством применения конструктивных и режимных решений; выравнивание градиента концентрации с целью снижения вязкости среды вблизи поверхности нагрева; применение переменной геометрии каналов.

Полученные экспериментальные данные позволяют глубже понять природу тепловых и массообменных процессов в вязких средах на примере тепловой обработки мисцелл растительных масел. Требуются дальнейшие исследования, особенно в области диффузионных процессов для данного класса растворов (такие комплексные исследования по взаимосвязи реологических и теплофизических свойств [20] авторами запланированы). Результатом такой работы должны стать математические модели, подобные тем, что уже созданы для других жидкостей [21].

Литература

1. Thome J.R., Cioncolini A. *Introduction to two-phase flow and boiling in channels*. In Encyclopedia of Two-Phase Heat Transfer and Flow. World Scientific Publishing, 2015, V. 3, pp. 1–4.
2. Ali M.E. Free convection heat transfer from the outer surface of vertically oriented helical coils in Glycerol-Water solution. *Heat and Mass Transfer*. 2004, V. 40, no. 8, pp. 615–620.
3. Saleem M., Hossain M.A., Saha S.C., Gu Y.T., Heat transfer analysis of viscous incompressible fluid by combined natural convection and radiation in an open cavity. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014, pp. 141–148.
4. Григорьев А.И. Внутренние поперечные флуктуационные волны в вязкой жидкости у твердой границы // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 6. С. 30–35.
5. Пиралишвили Ш.А., Ванчиков В.Ц. Массоперенос жидкости из гидродинамического потока в пристенный слой // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. №4(43). С. 78–83.
6. Krainov A.V., Arhipov V.A. Conjugate heat transfer during viscous incompressible liquid movement in the cavity considering its cooling through outer boundary. *The European Physical Journal Conferences*. 2016, V. 110, pp. 427–431.
7. Банных О.П., Гилевская О.В., Евстифеева А.А. Исследование процесса теплоотдачи при гидрировании растительных масел в стационарном слое катализатора // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. № 4. С. 136–140.
8. Valeru S.B., Putta N.R., Suman K.N.S. Optimization of vegetable oil properties in machining environment through CFD. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019, V. 8, Is. 12, pp. 644–649.
9. Ramesh G., Narayan Prabhu K. Wetting and cooling performance of vegetable oils during quench hardening. *Heat Transfer-Asian Research*. 2016. V. 45, Is. 4, pp. 342–357.
10. О'Брайен Р. Жиры и масла: производство, состав и свойства, применение: пер. с англ. СПб.: Профессия. 2007. 751 с.
11. Залетнев А.Ф., Федоров А.В. Теплофизические исследования в технологии переработки масличного сырья // Масложировая промышленность. 1993. № 5-6. С. 3–10.
12. Федоров А.В., Марков В.Н., Тагиев Ш.К., Романов Н.Н. Результаты исследования параметров гидродинамики и тепло- и массообмена двухфазного многокомпонентного потока в каналах оборудования для дистилляции // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2013. № 1. С. 49–51.
13. Остриков А.Н., Горбатова А.В., Копылов М.В., Аникин А.А. Анализ теплофизических характеристик рапсового масла // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2017. № 5(19) С. 11–14.
14. Сафаров М.М., Тагоев С.А., Юсупов Ш.Т. Влияние растворителей на поведение теплопроводности и теплоемкости хлопкового масла в широком интервале температур и давлений. Душанбе: Хирад, 2007. 92 с.
15. Sonkamble A., Sonsale R.P., Kanshette M.S., Kabara K.B. Relaxation dynamics and thermophysical properties of vegetable oils using time-domain reflectometry. *Eur Biophys J*. 2017, V. 46, Is. 3, pp. 283–291.
16. Федоров А.В., Баранов И.В., Тамбулатова Е.В., Волков С.М., Прохорова Л.Т., Крылов В.А. Исследование температурных зависимостей удельной теплоемкости рафинированных подсолнечных масел от их состава методом дифференциальной сканирующей калориметрии // Вестник Международной академии холода. 2019. № 1(70). С. 52–63.
17. Деревенко В.В. Анализ и оптимизация технологических параметров системы маслоэкстракционного завода // Масложировая промышленность. 2005. № 2. С. 12–14.
18. Кошевой Е.П., Верещагин А.Г., Схалыхов А.А., Чундышко В.Ю. Температуры кипения растворов масла в экстракционных растворителях // Новые технологии. 2014. № 1. С. 34–37.
19. Федоров А.В., Ефимов А.В., Тагиев Ш.К., Запрометов В.А. Новые экспериментальные данные по интенсивности на различных стадиях технологических процессов производства и переработки растительных масел // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2011. № 2. С. 11–15.

20. Федоров А.В., Баранов И.В., Новоселов А.Г., Тамбулатова Е.В., Крылов В.А., Федоров А.А., Волков С.М., Лисицын А.Н. Исследование структурных состояний жидкой фазы пищевых растительных масел // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: сб. тр. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2019. С. 43–47.
21. Rezanova E.V. Numerical modelling of heat transfer in the layer of viscous incompressible liquid with free boundaries. *The European Physical Journal Conferences*. 2017, V. 159, Is. 5, pp. 407–409.

References

1. Thome J.R., Cioncolini A. *Introduction to two-phase flow and boiling in channels*. In Encyclopedia of Two-Phase Heat Transfer and Flow. World Scientific Publishing, 2015, V. 3, pp. 1–4.
2. Ali M.E. Free convection heat transfer from the outer surface of vertically oriented helical coils in Glycerol-Water solution. *Heat and Mass Transfer*. 2004, V. 40, no. 8, pp. 615–620.
3. Saleem M., Hossain M.A., Saha S.C., Gu Y.T., Heat transfer analysis of viscous incompressible fluid by combined natural convection and radiation in an open cavity. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014, pp. 141–148.
4. Grigor'ev A.I. Internal transverse fluctuation waves in a viscous fluid near a solid boundary. *Journal of Technical Physics*. 2011, V. 81, Is. 6, pp. 30–35 (In Russian).
5. Piralishvili Sh.A., Vanchikov V.C. Mass transfer of fluid from the hydrodynamic flow to the wall layer. *Vestnik of P.A. Solov'yov Rybinsk State Aviation Technical University*. 2017, no. 4, pp. 78–83 (In Russian).
6. Krainov A.V., Arhipov V.A. Conjugate heat transfer during viscous incompressible liquid movement in the cavity considering its cooling through outer boundary. *The European Physical Journal Conferences*. 2016, V. 110, pp. 427–431.
7. Bannykh O.P., Gilevskaya O.V., Evstifeeva A.A. Investigation of the heat recovery process during the hydrogenation of vegetable oils in fixed-bed catalytic reactors. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2018, V. 8, no. 4, pp. 134–140 (In Russian).
8. Valeru S.B., Putta N.R., Suman K.N.S. Optimization of vegetable oil properties in machining environment through CFD. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019, V. 8, Is. 12, pp. 644–649.
9. Ramesh G., Narayan Prabhu K. Wetting and cooling performance of vegetable oils during quench hardening. *Heat Transfer-Asian Research*. 2016. V. 45, Is. 4, pp. 342–357.
10. O'Brien R.D. *Fats and oils: formulating and processing for applications*. CRC Press, 2004. 574 p.
11. Zaletnev A.F., Fedorov A.V. Thermophysical research in the technology of processing oilseed. *Fat and Oil Processing Industry*. 1993, no. 5-6, pp. 3–10 (In Russian).
12. Fjodorov A.V., Markov V.N., Tagijev Sh.K., Romanov N.N. Results of a research of parameters of hydrodynamics of heat and mass transfer of two phase multi-component current in equipment channels for miscella distillation. *Vestnik of the All-Russian Research Institute of Fats*. 2013, no. 1, pp. 49–51 (In Russian).
13. Ostrikov A.N., Gorbatova A.V., Kopylov M.V., Anikin A.A. Analysis of thermophysical characteristics of rapeseed oil. *Technologies of Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food*. 2017, no. 5, pp. 11–14 (In Russian).
14. Safarov M.M., Tagoev S.A., Yusupov Sh.T. *Influence of solvents on the behavior of thermal conductivity and heat capacity of cottonseed oil in a wide range of temperatures and pressures*. Dushanbe, Hired Publ., 2007. 92 p. (In Russian).
15. Sonkamble A., Sonsale R.P., Kanshette M.S., Kabara K.B. Relaxation dynamics and thermophysical properties of vegetable oils using time-domain reflectometry. *Eur Biophys J*. 2017, V. 46, Is. 3, pp. 283–291.
16. Fedorov A.V., Baranov I.V., Tambulatova E.V., Volkov S.M., Prokhorova L.T., Krylov V.A. Investigating the temperature dependence of refined sunflower oil specific heat capacity on its composition by the method of differential scanning calorimetry. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2019, no. 1, pp. 52–63 (In Russian).
17. Derevenko V.V. Analysis and optimization of technological parameters of the oil extraction plant system. *Fat and Oil Processing Industry*. 2005, no. 2, pp. 12–14 (In Russian).
18. Koshevoy E.P., Vereshchagin A.G., Skhalyakhov A.A., Chundyshko V.Yu. Boiling temperatures of oil solutions in extraction solvents. *New Technologies*. 2014, no. 1, pp. 34–37 (In Russian).
19. Fedorov A.V., Efimov A.V., Tagiev Sh.K., Saprometov V.A. New experimental data on the intensity at various stages of technological processes of production and processing of vegetable oils. *Vestnik of the All-Russian Scientific Research Institute of Fats*. 2011, no. 2, pp. 11–15 (In Russian).
20. Fedorov A.V., Baranov I.V., Новоселов А.Г., Тамбулатова Е.В., Крылов В.А., Федоров А.А., Волков С.М., Лисицын А.Н. Investigation of structural States of the liquid phase of edible vegetable oils. *Refrigeration and Food Technologies in the 21st Century*. Collection of works. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2019. pp. 43–47 (In Russian).
21. Rezanova E.V. Numerical modelling of heat transfer in the layer of viscous incompressible liquid with free boundaries. *The European Physical Journal Conferences*. 2017, V. 159, Is. 5, pp. 407–409.

Статья поступила в редакцию 19.10.2020