

Г. Н. Зиннатуллина, А. В. Давыдов, В. В. Бронская,
Н. Х. Зиннатуллин

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Ключевые слова: центробежная жидкая пленка; поля скоростей, температур и концентраций; пограничные слои; абсорбция и хемосорбция.

В статье приведены результаты анализа тепло- и массообменных процессов, происходящих в центробежных пленках. Математическое моделирование процессов проведено с использованием модели теплового и диффузионного пограничных слоев. Из массообменных процессов рассмотрены физическая абсорбция и хемосорбция.

Keywords: centrifugal liquid film, the velocity field, temperature and concentration, boundary layers, absorption and chemisorption.

The results of the analysis of heat and mass transfer processes occurring in centrifugal films presented in the article. Mathematical modeling of processes carried out using the model thermal and diffusion boundary layers. Of mass transfer processes considered physical absorption and chemisorption.

В центробежных аппаратах осуществляется дополнительный внешний подвод механической энергии, что позволяет создавать в них интенсивную термо- гидродинамическую обстановку и сильно развитую межфазную поверхность [1-3].

Впервые процесс теплообмена вблизи вращающегося диска, погруженного в жидкость описал И.А.Кибель [4]. Основываясь на решении соответствующей гидродинамической задачи, выполненной Карманом и Кокрэнном, он рассчитал процесс теплообмена в ламинарной постановке при числах Прандтля $Pr=1$. Поля скоростей и температур считались независимыми друг от друга. В дальнейшем коэффициент теплоотдачи от вращающегося диска в жидкость (воздух) определяли Вагнер, Дэвис, Дорфман, Лойцянский и др. Подробный анализ этих публикаций приводится в работе [5]. Необходимо отметить один общий недостаток выше перечисленных работ: задачи решались в изотермической постановке.

Рассмотрим работы, в которых обсуждается термо- гидродинамические параметры открытых центробежных пленок. В них реализуется тонкопленочный режим течения жидкости, характеризующийся малым термическим сопротивлением и развитой межфазной поверхностью.

Бромли [6] получил формулу для коэффициента теплоотдачи для вращающегося диска при одновременном испарении и конденсации одного и того же вещества на противоположных его сторонах. Толщина пленки рассчитывалась им по Хинце-Мильборну [7] при допущении, что жидкость на диске течет только в радиальном направлении. Почти всегда возникавшие волны несколько увеличивали коэффициента теплоотдачи. Теоретический анализ теплообмена в слое вязкой жидкости на вращающемся диске провел Дорфман Л.А. [8]. В работе рассмотрено ламинарное течение без учета поверхностного натяжения и сопутствующих ему волновых явлений, а также трения жидкой пленки относительно газовой среды.

Также не учитывалось тепловое взаимодействие на границе раздела жидкость-газ, а физические свойства жидкости считались постоянными. Численный расчет показал, что коэффициент теплообмена от диска с ростом числа Рейнольдса существенно увеличивается, почти пропорционально $Re^{0.5}$.

Математические модели процессов теплообмена, не учитывающие зависимость вязкости от температуры, не могут считаться удовлетворительными. Действительно, в [9] доказывается, что даже слабая зависимость вязкости от температуры приводит к качественному отличию течения Пуазейля от классического.

Вопросам теплообмена на вращающихся дисках посвящен ряд работ Тябина Н.В. с сотрудниками [10-12]. Им рассмотрено неизотермическое течение вязкой жидкости, текущей по поверхности плоского диска, с учетом возможного отставания жидкости и инерционных членов уравнения движения. При этом температура диска задана, как у Дорфмана Л.А. [8] в виде двучлена:

$$T=T_1(\delta)+T_2(\delta) r^2, \quad (1)$$

где δ – толщина пленки, r – радиус диска

Полученные результаты позволяют рассчитать коэффициент теплоотдачи от диска к пленке жидкости. Экспериментальная проверка полученных зависимостей не проводилась.

Решение задачи теплообмена при тонкопленочном течении жидкости в поле центробежных сил, с учетом зависимости ее вязкости от температуры, выполнено в работах [5, 13,14]. В работе [13] рассмотрен процесс теплообмена в вязкой и степенной жидкости при тепловых граничных условиях 1 рода ($T=\text{const}$) на границе раздела фаз (стенка-жидкость, жидкость-газ); конвективные члены в уравнении движения пренебрежены, а в уравнении энергии осреднены по методу Петухова С.Б. Зависимость вязкости от температуры была задана в виде степенного ряда. Аналогичная задача для конуса для тепловых граничных условий второго рода ($q=\text{const}$) была

решена в работе [14]. Экспериментальная проверка полученных зависимостей была выполнена на примере плоского диска. Подробный анализ этой задачи выполнен в работах Булатова [5,15]. В пленке жидкости условно выделяется три зоны: термический начальный участок, область прогрева пленки и область установившегося теплообмена. Определены размеры зон и их тепло-гидродинамические параметры. В третьей зоне переход температур между поверхностью ротора и поверхностью пленки незначителен и составляет, как правило, несколько градусов. Поэтому третья зона характеризуется интенсивной массоотдачей, что приводит к уменьшению расхода и в некоторых случаях к высыханию пленки. Экспериментальная проверка полученных зависимостей выполнена для среднемассовой температуры жидкости от плотностеплового потока и расхода жидкости.

Работы [16-20] посвящены экспериментальному изучению процессов теплообмена при течении жидкой пленки по вращающейся поверхности. В [16] исследования проводились на вращающемся конусе, с внутренней стороны которого реализовалось тонкопленочное течение. Авторы приходят к выводу, что величина коэффициента теплоотдачи при прочих равных условиях зависит от плотности орошения поверхности и величины центробежной силы, причем от второй – в большей степени. Теплообмен при испарении пленки жидкости и конденсации пара на вращающейся поверхности рассмотрен Рифертом В.Г. с сотрудниками [17,18] и Васильевым А.В. [19]. Режимы парообразования и интенсивность теплообмена при кипении жидкости на вращающейся поверхности был исследован Пуховым И.И. [20].

Булатовым А.А. рассмотрена задача об испарении летучей жидкости в отсутствии подвода тепла [21]. Интенсивное испарение жидкости вызывает ее охлаждение и развивается тепловой пограничный слой. Им же, в квазитурбулентном предположении пристенного пограничного слоя проведено математическое моделирование процесса пузырькового кипения жидкости в центробежном пленочном испарителе [5]. Теоретические зависимости подтверждены экспериментальными данными в первом случае – Дунского В.Ф. [22], во втором – Пухового И.И. [20]. В [23] рассматривается теплоотдача при ламинарно-волновом и турбулентном режимах, а также устойчивость ламинарно-волнового течения. Теплоотдача значительно улучшается с увеличением скорости вращения диска при обоих режимах течения.

В работе [24] поведение центробежной жидкой пленки рассмотрено для конического ротора при тепловых граничных условиях второго рода с учетом тепловых потерь в парогазовую фазу. Получены зависимости для расчета среднемассовой температуры, числа Нуссельта и других технологических параметров процесса нагрева пленки.

Авторы работ [25-27] изучали распределение температур перегретой пленки жидкости, движущейся по вращающемуся диску. Исследовалась морская и солоноватая вода массовой концентрацией 2-6 %. Полученные теоретические и экспериментальные данные могут быть использованы при расчете центробежных опреснительных установок. Результаты показали, что при постоянной паропроизводительности с уменьшением расхода жидкости и ростом начального перегрева жидкости радиус диска убывает.

Экспериментальные работы по применению центробежных пленочных аппаратов для проведения массообменных процессов были выполнены А.А. Александровским [28-30] и Р.Ш.Сафиним [31]. Экспериментальные работы А.А. Александровским были выполнены на примерах абсорбции в системах аммиак-вода, этанол-вода, ацетон-вода. Была выявлена зависимость коэффициента массопередачи в зависимости от расхода жидкости, скорости движения газовой фазы, от числа оборотов ротора аппарата, от угла конусности рабочего элемента ротора. Аналогичные исследования были проведены Р.Ш.Сафиним в центробежном аппарате новой конструкции [32].

Одним из первых, кто предложил математическую модель массообмена в пленке жидкости, текущей по вращающемуся диску был В.Г. Левин [33]. Массообмен был проанализирован в пределах диффузионного пограничного слоя. В работе [34] рассмотрена задача массообмена в слое жидкости на вращающейся спиральной поверхности в отсутствии волнообразования. Определены локальный и средний коэффициенты массоотдачи. Исследованию входного участка этой задачи с учетом на процесс влияния газового потока была посвящена работа [35].

Экспериментальная работа по абсорбции кислорода и двуокиси углерода водой, текущей по вращающейся конической поверхности была выполнена авторами работы [36]. Авторы отмечают отсутствие надежной теоретической модели, адекватно описывающей результаты эксперимента.

Работы [37-40] посвящены исследованию абсорбции газов в тонких пленках жидкости, текущих в центробежном поле. Рассмотрен процесс абсорбции плохо растворимого газа в изотермических условиях. Это означает, что основное сопротивление массообмену сосредоточено в жидкой фазе. Задача решается введением модели диффузионного пограничного слоя методом интегральных соотношений. В пленке жидкости выделяются две области: формирования диффузионного пограничного слоя и установления равновесного массообмена. Считается, что на свободной поверхности жидкости устанавливается равновесная концентрация абсорбируемого газа согласно закону Генри. В первой области критерий Шервуда монотонно убывает до значения $Sh=3.64$, а во второй области не меняется. Предлагается использовать протяженность первой зоны для

оценки эффективности процесса абсорбции. Неизотермическая абсорбция газа в пленку вязкой жидкости, текущей по поверхности вращающегося конуса, выполнена с учетом теплообмена в окружающая среда.

Совместное решение уравнений движения, энергии и диффузии позволили определить: изменение толщины пленки жидкости, теплового и диффузионного пограничных слоев, протяженности областей, температуры и концентрации растворенного газа, коэффициентов тепло- и массоотдачи. Показано, что как и в случае изотермической абсорбции, критерий Шервуда асимптотически стремится к постоянному значению $Sh=3.64$.

Изотермическая абсорбция газа центробежной пленкой жидкости с учетом сопротивления переносу импульса и массы со стороны газовой среды была рассмотрена в условиях ламинарного движения фаз, отсутствия волнообразования на свободной поверхности жидкости и граничных условиях четвертого рода. Процесс условно рассматривается в двух областях и для них получены аналитические зависимости для расчета параметров течения фаз и абсорбции газа. Модель охватывает случаи абсорбции плохо-, средне- и хорошо растворимых газов пленками жидкости в поле центробежных сил. Проведены экспериментальные исследования по абсорбции двуокиси углерода (плохо растворимый газ).

В работах [41-45] проведено математическое моделирование хемосорбционного поглощения газов пленкой жидкости, текущей по поверхности конической насадки. Уравнения конвективной диффузии, записанных для жидкой и газовой фаз, решались методом интегральных соотношений, используя модель диффузионного пограничного слоя без учета на процесс теплоты абсорбции и химического превращения, т.е. в изотермической постановке. В этих работах оценены степень и характер влияния на процесс режимных параметров, концентрации и свойств абсорбируемого газа и хемосорбента. Считалось, что на свободной поверхности пленки устанавливается равновесная концентрация газа по закону Генри и основное сопротивление масопередачи заключено в жидкой фазе.

В работе [39] рассмотрена хемосорбция трудно растворимых газов в центробежной пленке для случая, когда газ, растворяющийся в жидкости вступает в объемную химическую реакцию первого порядка. Получены зависимости для количественной оценки процесса хемосорбции, выявлено влияние константы химической реакции на коэффициент ускорения. В работах [41-44] рассмотрен случай, когда в объеме пленки жидкости происходит мгновенная химическая реакция. Получены аналитические зависимости для расчета коэффициентов массоотдачи и координаты полного истощения хемосорбента. Установлено, что наиболее интенсивный процесс хемосорбции происходит в начальной области.

В работах [43-44] рассмотрено математическое моделирование абсорбции газов центробежной жидкой пленкой, осложненное объемной необратимой химической реакцией второго порядка. Получены зависимости для расчета технологических параметров процесса и установлено, что во второй области, области установления равновесия, критерий Шервуда имеет постоянное значение и равен $Sh=3.64$.

Проведенные экспериментальные исследования на примере водных растворов моно- и диэтаноламинов и диоксида углерода (абсорбция, сопровождаемая объемной химической реакцией второго порядка) показали адекватность математического описания физике процессов.

В заключение отметим, в центробежной пленке тепло- и массообменные процессы в условиях волнообразования и турбулентности, а также взаимодействия пленки жидкости конвективной газовой фазой не изучены.

Литература

1. Н.Х. Зиннатуллин, А.А. Булатов, С.Г. Николаева, Г.Н. Зиннатуллина. Вестник Казанского технологического университета, т.15, 1, 125-127, 2012
2. А.В. Давыдов, В.В. Бронская, Н.Х.Зиннатуллин. Вестник Казанского технологического университета, Т.15, 23, 145-147, 2012
3. Н.Х. Зиннатуллин, А.А. Булатов, Р.Г.Галимуллин, А.И. Хайбуллина. Вестник Казанского технологического университета, Т.16, 3, 66-68, 2013
4. И.А. Кибель Прикладная математика и механика, Т.11, 6, 611-614, 1947
5. А.А. Булатов Дисс. канд. техн. наук. КГТУ, Казань, 1987, 187 с.
6. I.A. Bromley Ind. And End. Chem., V.50, 2, 233-239, 1958
7. J.O.Hinze, H. Milborn J. Appl. Mech., V. 17, 2, 145-154, 1950
8. Л.А. Дорфман. Инженерно-физический журнал, Т.12.3, 309-316, 1967
9. С.К. Асланов, В.П. Борко. Всб.: Математические методы тепломассопереноса. Днепрпетровск, 1979, 119-123 с.
10. Г.И.Лепехин, Н.В. Тябин. Всб.: Реология в процессах и аппаратах химической технологии. Волгоград. ВПИ, 1975, 82-91 с.
11. Г.В. Рябчук, Г.И. Лепехин, Н.В. Тябин. Химическое машиностроение, вып.6, 107-112, 1977
12. Г.И. Лепехин, Г.В. Рябчук, Н.В. Тябин Всб.: Тепло-массообмен в реологически сложных средах. Минск, ИТМО, 1976, Т.7, 146-154 с.
13. Ф.М. Гимранов Дисс. канд. техн. наук. КГТУ, Казань, 1975, 140 с.
14. Д.Т.Мусин Дисс. канд. техн. наук. КГТУ, Казань, 1987, 167 с.
15. А.А.Булатов, Ф.М. Гимранов, Н.Х. Зиннатуллин. Теоретические основы химической технологии, т. 24, 6, 735-742, 1990
16. С.Г. Стародуб, И.Б. Хилинский, С.Г. Горсш. Всб.: Труды Московского института химического машиностроения. Москва, МИХМ, 1975, вып.57, С.25-32.
17. В.Г. Риферт, П.А. Барабаш, А.А. Мужилко. Промышленная теплотехника, 2, 43-48, 1980
18. В.Г. Риферт, П.А. Барабаш, А.А. Мужилко. Всб.: Перспективы промышленной теплоэнергетики. Москва, 1977, 111-113 с.

19. А.В.Васильев Дисс. канд. техн. наук. ХПП, Харьков, 1977, 148 с.
20. И.И.Пуховой Кипение и конденсация, 2, 73-78, 1978
21. А.А. Булатов, Н.Х. Зиннатуллин, С.Г. Николаева, Инженерно-физический журнал, Т.70, 2, 217-219, 1997
22. В.Ф. Дунский, Н.В. Никитин. Инженерно-физический журнал, т. 37, 3, 465-471, 1979
23. Т.В. Суржик, И.И. Пуховой, Химическая технология, 6, 40-45, 1984
24. Ф.М. Гимранов, Г.Н. Зиннатуллина, Е.Б. Гаврилов, Б.М. Азизов, И.Ф. Флегентов. Инженерно-физический журнал, т. 68, 5, 781-788, 1995
25. О.А. Долинский, В.Г. Риферт, П.А. Барабаш Промышленная теплотехника, Т5, 5, 33-38, 1983
26. О.А. Долинский, В.Г. Риферт, П.А. Барабаш Промышленная теплотехника, Т5, 6, 16-21, 1983
27. О.А. Долинский. Промышленная теплотехника, Т10, 4, 41-45, 1988
28. А.А. Александровский Всб.: Труды КХТИ. Вып.22, 192-199; 1958
29. А.А. Александровский Всб.: Труды КХТИ. Вып.31, 3-15; 1963
30. А.А. Александровский, В.В. Кафаров. Всб.: Материалы межвузовской конференции по машинам и аппаратам диффузионных процессов. Казань, КХТИ. 1961, 157-167 с.
31. Р.Ш. Сафин, А.М. Николаев, Н.М. Жаворонков Материалы межвузовской конференции по машинам и аппаратам диффузионных процессов. Казань, КХТИ. 1961, 292-296 с.
32. Р.Ш. Сафин. Авторское свидетельство. № 19008 от 12 ноября 1958 г.
33. В.Г. Левин Физико-химическая гидродинамика. Физматгиз, Москва, 1959, 699 с.
34. Н.С. Мочалова, Л.П. Холпанов, В.Я.Шкадов, Инженерно-физический журнал, т. 25, 4, 648-655, 1973
35. Н.С. Мочалова, Л.П. Холпанов, В.Я.Шкадов, Инженерно-физический журнал, т. 31, 4, 684-690, 1976
36. S.Uchida, H. Kamo, E.Itoh, A. Kybato, S. Kawai. Chem. and Eng. Technol., V. 12, 4, 245-248, 1989
37. С.А. Конев, Ф.М.Гимранов, А.А. Булатов, Н.Х. Зиннатуллин, М.А. Диульский Всб.: Тепло-массообмен в химической технологии. Казань, КГТУ, 1990, 43-48 с.
38. С.А. Конев, Ф.М.Гимранов, Н.Х. Зиннатуллин, Е.Б. Гаврилов Всб.: Интенсификация химических процессов переработки нефтяных компонентов . Казань, КГТУ, 1993, 73-80 с.
39. Ф.М.Гимранов, Г.Н. Зиннатуллина, С.А.Конев, Б.М. Азизов Всб.: Массообменные процессы и аппараты в химической технологии. Казань, КГТУ, 1993, 72-78 с.
40. С.А. Конев Дисс. канд. техн. наук. КГТУ, Казань, 1995, 211 с.
41. Ф.М.Гимранов, Г.Н. Зиннатуллина, Б.М. Азизов, Д.Н. Латыпов, Н.И. Всб.: Массообменные процессы и аппараты в химической технологии. Казань, КГТУ, 1994, С. 94-97.
42. Ф.М.Гимранов, Г.Н. Зиннатуллина, Б.М. Азизов, ЖПХ, Т.71, 6, 971-976, 1998
43. Г.Н. Зиннатуллина, Е.Б. Гаврилов, Ф.М.Гимранов Всб.: Массообменные процессы и аппараты в химической технологии. Казань, КГТУ, 2000, С.100-112.
44. Г.Н. Зиннатуллина, Ф.М.Гимранов, Б.М. Азизов Всб.: Массообменные процессы и аппараты в химической технологии. Казань, КГТУ, 2002, С.110-117.

© Г. Н. Зиннатуллина. – канд. техн. наук, доц. каф. промышленной безопасности КНИТУ; А. В. Давыдов – аспирант КГЭУ; В. В. Бронская – канд. техн. наук, доц. каф. процессов и аппаратов химической технологии КНИТУ dweronika@mail.ru; Н. Х. Зиннатуллин – д-р техн. наук, проф. той же кафедры.