УДК 517.958:531.12; 66.021.1:536.2

РАЗДЕЛЕНИЕ ДВУХФАЗНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ ЗА СЧЕТ ОБОГРЕВА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ахмадиев Ф.Г., Гильфанов Р.М.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Во многих отраслях промышленности, таких как пищевая, нефтехимическая, энергетическая, медицинская часто встречаются процессы, в которых осуществляется разделение гетерогенных сред при пленочных режимах их реализации, при этом они изучены недостаточно полно. Целью настоящей работы является математическое моделирование на основе уравнений механики многофазных сред процесса разделения двухфазных высоковязких эмульсий при их пленочном течении по рабочим обогреваемым поверхностям сложной формы с учетом тепломассообмена с окружающей средой. Разработанная в работе математическая модель состоит из нелинейных уравнений сохранения массы, импульса и энергии, записанных и упрощенных для произвольной ортогональной системы координат, связанной с поверхностью реализации процесса с учетом его особенностей и соответствующих граничных условий. При этом уравнения неразрывности и сохранения импульса решаются аналитически, а для решения уравнений сохранения энергии используется приближенный метод Слезкина. По построенной математической модели проведены численные расчеты, на примере двухфазной эмульсии – тяжелой пиролизной смолы, и получены результаты для различных значений режимных параметров реализации процесса. Расчетные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке.

Полученные в работе результаты являются новыми и в частных случаях совпадают с известными, по литературным источникам, решениями подобных задач. Они представляют практический интерес при моделировании различных процессов, связанных с разделением фаз высоковязких двухфазных сред, реализуемых на обогреваемых поверхностях в пленочном режиме течения.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих отраслях промышленности, таких как пищевая, нефтехимическая, энергетическая, медицинская часто встречаются процессы, в которых осуществляется переработка гетерогенных сред при пленочных режимах их реализации – это разделение смесей, опорожнение резервуаров, студнение, сушка и т.д. В качестве примеров можно привести такие процессы как удаление влаги из фосфолипидных эмульсий подсолнечных масел в ротационно-пленочных аппаратах или удаление дисперсной фазы - воды из двухфазной эмульсии - тяжелой пиролизной смолы (ТПС), образующейся в качестве побочного продукта при производстве этилена на комплексах Э-200, при ее термической переработке в пленочном аппарате и. т.д.

Для проектирования аппаратов, в которых могут В работе проведено математическое моделирование процесса разделения двухфазной эмульсии при пленочном ее течении по рабочим обогреваемым поверхностям сложной формы с учетом тепломассообмена с окружающей средой. Разработанная математическая модель состоит из уравнений сохранения механики гетерогенных сред, записанных и упрощенных для произвольной ортогональной системы координат, связанной с поверхностью реализации процесса с учетом его особенностей и соответствующих граничных условий. При этом уравнения неразрывности и сохранения импульса решаются аналитически, а для решения уравнений сохранения энергии

© Ахмадиев Ф.Г., Гильфанов Р.М.

используется приближенный метод Слезкина. По построенной математической модели проведены численные расчеты, на примере двухфазной эмульсии – тяжелой пиролизной смолы, и получены результаты для различных значений режимных параметров реализации процесса. Они являются основой для постановки и решения задачи оптимального аппаратурного оформления процесса.

Быть эффективно реализованы вышеперечисленные процессы, необходимо уметь моделировать термогидродинамическую обстановку в узлах таких аппаратов с учетом многофазности потоков и температурной зависимости реологических и физико-механических характеристик перерабатываемых сред. Имеется целый ряд работ, в которых изучаются проблемы моделирования процессов разделения многофазных систем при их неизотермическом пленочном режиме реализации [1-3]. Но в них не рассматриваются вопросы совместного тепломассообмена и решения уравнений сохранения импульса и энергии.

Целью настоящей работы является математическое моделирование на основе уравнений механики многофазных сред процесса разделения двухфазной эмульсии при ее пленочном течении по рабочим обогреваемым поверхностям.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассматривается ламинарное установившееся пленочное течение двухфазной эмульсии по обогреваемой поверхности под действием массовых сил. Перерабатываемая эмульсия подается в рабочую зону обогреваемой поверхности, где она нагревается до температуры кипения легкокипящей дисперсной фазы, при которой начинается ее выпаривание, после всплытия на поверхность пленки эмульсии.

Чтобы эффективно осуществлять процесс выпаривания легкокипящей дисперсной фазы из эмульсии необходимо определить оптимальные режимные и конструктивные параметры его ведения. Определение оптимальных значений этих параметров можно осуществить с помощью математической модели, адекватно описывающей термогидродинамическую обстановку в аппарате. При математическом моделировании процесса условно можно выделить три характерных этапа (зоны) процесса (рис.1):

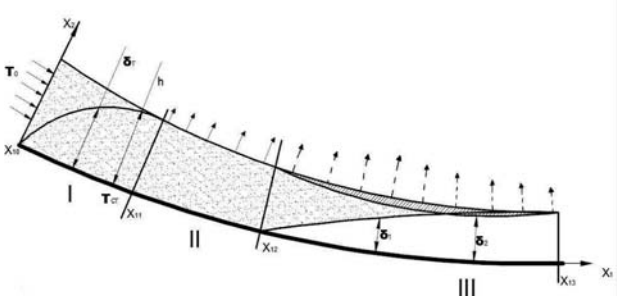

Рис.1 Расчетная схема процесса разделения фаз двухфазной эмульсии.

1) зона развития теплового пограничного слоя; 2) зона развитого теплообмена; 3) зона развитого тепломассообмена.

Выделение таких характерных зон при математическом моделировании процесса обусловлено рядом особенностей, присущих каждой из них в отдельности, что позволяет существенно упростить их математические модели. При этом предполагаем, что трение пленки эмульсии о воздух и диссипативное выделение тепла в пленке пренебрежимо малы, температура окружающей воздушной среды незначительно отличается от входной начальной температуры эмульсии. Тогда уравнения механики гетерогенных сред, описывающие плоское или осесимметричное неизотермическое пленочное течение двухфазной эмульсии по обогреваемой поверхности, при $\varepsilon_{21} = H/L << 1$ и $V_{ix_3} \approx 0$ согласно [3] в ортогональной системе координат x_1, x_2, x_3, связанной с поверхностью течения, записываются в виде:

$$\frac{\partial(H_2 H_3 \rho_1 U_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(H_1 H_3 \rho_1 V_1)}{\partial x_2} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_1\left(\frac{U_1}{H_1}\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{V_1}{H_2}\frac{\partial U_1}{\partial x_2} + \frac{U_1 V_1}{H_1 H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}\right) = -\frac{\alpha_1}{H_1}\frac{\partial P}{\partial x_1} + \tau_1 - F_{12x_1} + \rho_1 F_1, \quad (2)$$

$$\rho_1 \frac{U_1^2}{H_1 H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2} = -\frac{\alpha_1}{H_2}\frac{\partial P}{\partial x_2} - F_{12x_2} + \rho_1 F_2, \quad (3)$$

$$\rho_1 c_{p_1}\left(\frac{U_1}{H_1}\frac{\partial T_1}{\partial x_1} + \frac{V_1}{H_2}\frac{\partial T_1}{\partial x_2}\right) = \frac{1}{H_1 H_2 H_3}\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{H_1 H_3}{H_2}\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_2}\right) + q21, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(H_2H_3\rho_2U_2)}{\partial x_1}+\frac{\partial(H_1H_3\rho_2V_2)}{\partial x_2}=0\,, \qquad (5)$$

$$\rho_2\left(\frac{U_2}{H_1}\frac{\partial U_2}{\partial x_1}+\frac{V_2}{H_2}\frac{\partial U_2}{\partial x_2}+\frac{U_2V_2}{H_1H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}\right)= \\ =-\frac{\alpha_2}{H_1}\frac{\partial P}{\partial x_1}+F_{12x_1}+\rho_2F_1 \qquad (6)$$

$$\rho_2\frac{U_2^2}{H_1H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}=-\frac{\alpha_2}{H_2}\frac{\partial P}{\partial x_2}+F_{12x_2}+ \\ +\rho_2F_2 \qquad (7)$$

$$\rho_2c_{p_2}\left(\frac{U_2}{H_1}\frac{\partial T_2}{\partial x_1}+\frac{V_2}{H_2}\frac{\partial T_2}{\partial x_2}\right)= \\ =\frac{1}{H_1H_2H_3}\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{H_1H_3}{H_2}\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial x_2}\right)+q_{12} \qquad (8)$$

$$\alpha_1+\alpha_2=1, \qquad (9)$$

где через τ_1 обозначен член, учитывающий реологические свойства эмульсии, $\mathbf{F}_{12}=f_{12}(\alpha_2,\mu_{эфф.},d)(\mathbf{V}_1-\mathbf{V}_2)$ – сила межфазного взаимодействия, q_{ji} – контактный приток тепла от $j-$ой фазы к $i-$ой фазе, $\mathrm{F}(F_1,F_2,F_3)$ – вектор массовых сил.

Уравнения (1)–(9) при соответствующих граничных условиях описывают неизотермическое пленочное течение эмульсии по обогреваемой поверхности. В качестве реологического уравнения состояния эмульсии, в частности, можно принять закон Оствальда де Виля (степенной закон). Решение системы уравнений (1)–(9) рассмотрим для каждой зоны в отдельности при соответствующих граничных условиях.

При рассмотрении процесса выпаривания дисперсной фазы из эмульсии будем учитывать только температурную зависимость эффективной вязкости, остальные теплофизические характеристики будем считать постоянными. Для учета температурной зависимости эффективной вязкости смеси можно использовать различные аппроксимации, в частности, полиномиальную

$$\frac{\mu_{эфф}(T_o)}{\mu_{эфф}(T)}=1+\sum_{k=1}^{n_1}a_\kappa\theta^\kappa\,, \qquad (10)$$

здесь $\theta=(T-T_0)/(T_{cm}-T_0)$ безразмерная температура.

Решение системы уравнений (1)–(9) с учетом температурной зависимости эффективной вязкости (10) для зон развития теплового пограничного слоя, развитого теплообмена и развитого тепломассообмена рассмотрим в отдельности.

Зона развития теплового пограничного слоя $(x_{10}\le x_1\le x_{11})$**.** Данная зона состоит из теплового пограничного слоя и слоя «холодной смеси с температурой T_o''. Для каждого слоя система уравнений (1)–(9) решается самостоятельно с учетом условий сопряжения на линии $x_2=\delta_T$. Предполагается, что $T_1\approx T_2=T$.

Граничные условия для зоны развития теплового пограничного слоя можно представить в виде:

при $x_2=0$: $U_1=U_2=V_1=V_2=0,\ \theta=1;$ (11.1)

при $x_2=\delta_T$: $U_{1\delta_T}=U_{1\mathrm{h}}$, $V_{1\delta_T}=V_{1h}$,

$$\tau\delta_T=\tau_{\mathrm{h}},\ \theta=0,\ \frac{\partial\theta}{\partial x_2}=0 \qquad (11.2)$$

при $x_2=h$: $P=P_{\mathrm{a}},\ \tau_h=0;$ (11.3)

при $\delta_T\le \mathrm{x}_2\le h$: $\theta=0.$ (11.4)

Решение уравнений системы (1)–(9) при граничных условиях (11) для малых значений *Re*, без учета инерционных членов в уравнениях (2) и (6), осуществляется согласно алгоритму, изложенному в [3].

Зона развитого теплового слоя $(\delta_T=h,\ x_{11}\le x_1\le x_{12})$**.** После достижения тепловым пограничным слоем поверхности пленки начинается вторая зона развитого теплового слоя и происходит обогрев эмульсии до необходимой температуры T_k, при которой из нее начинается испарение дисперсной фазы с поверхности пленки. Тогда с учетом теплообмена через свободную поверхность граничные условия для системы (1)–(9) можно представить в виде:

при $x_2=0$: $U_1=U_2=V_1=V_2=0,$
$\theta=1$ (12.1)

при $\mathrm{x}_2=h$: $P=P_{\mathrm{a}},\ \tau=0,$

$$\alpha_a(T(h)-T_a)=-\lambda\frac{\partial T}{H_2\partial x_2}; \qquad (12.2)$$

при $x_1=x_1$: $h=\delta_{\mathrm{T}},\ U_i=U_i\left(x_{11},x_2\right),$

$$V_i=V_i\left(x_{11},x_2\right),\ \theta=\theta\left(x_{11},x_2\right), \qquad (12.3)$$

где $h,\ V_i\left(x_{11},x_2\right),\ \theta\left(x_{11},x_2\right)$

определяются решением задачи для теплового пограничного слоя $(i=1,2)$.

Коэффициент теплоотдачи от поверхности пленки α_a может быть определен экспериментально или по литературным источникам.

Решение системы уравнений (1)–(9) при граничных условиях (12) и малых значениях числа *Re* проводится также как и для первой зоны развития теплового пограничного слоя приближенным методом Слезкина для уравнения сохранения энергии.

Зона развитого тепломассообмена $(x_1 \ge x_{12})$**.** После достижения температуры на поверхности пленки эмульсии значения T_k в конце второй зоны (температура испарения дисперсной фазы) из нее начинает выпариваться дисперсная фаза по мере ее всплытия на поверхность пленки. При этом для рассматриваемых систем коэффициенты теплопроводности и температуропроводности дисперсной фазы эмульсии во много раз больше соответствующих коэффициентов сплошной фазы и поэтому ее температура относительно быстро передается каплям и температура во всем объеме пленки остается относительно однородной. В дальнейшем температура дисперсной фазы уже повышаться не может и начинается ее фазовое превращение, всплытие на поверхность пленки и испарение.

При моделировании процесса тепломассообмена предполагается, что в пленке эмульсии образуются два слоя: однородный слой сплошной фазы, прилегающий к обогреваемой поверхности и двухфазный слой, с поверхности которого происходит испарение дисперсной фазы. При этом в двухфазном слое объемная доля дисперсной фазы не меняется, а уменьшение ее доли в эмульсии из–за испарения учитывается через уменьшение толщины пленки. Тогда термогидродинамическая обстановка в нижнем однородном слое описывается уравнениями (1)–(4) при $\alpha_1 = 1$ без, учета силы межфазного взаимодействия $\mathbf{F_{12}}$, при соответствующих замыкающих (реологических) соотношениях, а в двухфазном слое уравнениями (1)–(9). При этом уравнение неразрывности для дисперсной фазы (5) в двухфазном слое для любого микрообъема пленки эмульсии не выполняется в связи с ее испарением. Вместо него будем использовать соотношение, которое выражает условие, что тепловой поток, уходящий с поверхности пленки равен количеству тепловой энергии, необходимой для превращения в пар дисперсной фазы с той же поверхности (условие сохранения энергии на поверхности пленки жидкость-пар):

$$\frac{\lambda}{H_2}\frac{\partial T}{\partial x_2} = \rho_2 \frac{r}{H_1}\frac{d}{dx_1}\int_{\delta_1}^{h} U_2 H_2 dx_2 \,. \qquad (13)$$

Данную систему уравнений, описывающую испарение всплывающей дисперсной фазы, необходимо решать при следующих граничных условиях (условия на поверхности пленки, прилипания и сопряжения на линии раздела):

при $x_2 = 0: U_0 = V_0 = 0,\ \theta = 1;$ (14.1)

при $x_2 = \delta_1 : U_1 = U_0,\ \alpha_1 V_1 = V_0, \tau_{\delta_1} = \tau_h,$

$$\frac{\lambda_0}{H_2}\frac{\partial \theta_0}{\partial x_2} = \frac{\lambda}{H_2}\frac{\partial \theta}{\partial x_2},\ \theta_0 = \theta, P_0 = P; \qquad (14.2)$$

при $x_2 = h: P = P_a,\ \tau = 0$ и

$$\frac{\lambda}{H_2}\frac{\partial T}{\partial x_2} = \rho_2 \frac{r}{H_1}\frac{d}{dx_1}\int_{\delta_1}^{h} U_2 H_2 dx_2\,; \qquad (14.3)$$

при $x_1 = x_{12} : \delta_1 = 0,\quad \theta = \theta(x_{12}, x_2),$

$$U_i = U_i(x_{12}, x_2),\ V_i = V_i(x_{12}, x_2), \qquad (14.4)$$

где δ_1 – толщина прилегающего к стенке однофазного слоя; U_0, V_0, θ_0 – соответственно его продольная и поперечная скорости и температура; r – теплота фазового превращения воды в пар; значения $\theta(x_{12}, x_2),,\ h(x_{12}),\ U_i(x_{12}, x_2)$ определяются решением задачи в предыдущей зоне $(i = 1,2)$.

Порядок решения вышеуказанной системы уравнений при условиях (14) практически такой же, что и для предыдущих зон:

Эта система уравнений состоит из одного алгебраического и трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

Данная система дифференциальных уравнений решается методом Рунге-Кутты, а алгебраическое уравнение на каждом шаге решается методом деления отрезка пополам.

В третьей зоне, при определенных условиях, возможен следующий вариант реализации процесса: когда температура воздуха над пленкой низкая или происходит интенсивное всплытие капель дисперсной фазы из-за высокого значения T_{cm}, они не успевают мгновенно испаряться и вследствие этого на поверхности пленки образуется дополнительный слой из дисперсной фазы.. Моделирование тепломассообмена при умеренных числах Рейнольдса ($Re \ge 1$), которое сводится к решению системы уравнений (1)–(9), вызывает большие вычислительные трудности. Для этих целей может быть использован метод поверхностей равных расходов, предложенный Холпановым Л.П. и Шкадовым В.Я., который модифицирован для расчета подобных течений в [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Численные расчеты по построенной математической модели были проведены для случая течения эмульсии (ТПС) по плоской наклонной обогреваемой поверхности (НОП), угол наклона которой к горизонту составлял $\beta = 45^0$. При их реализации использовались четыре образца ТПС с объемным содержанием в них дисперсной фазы α_2: 0.05, 0.09, 0.15, 0.18. Расход ТПС Q на единицу ширины НОП в ходе расчетов варьировался в диапазоне от 0.001 кг/(м с) до 0.06 кг/(м с). Температура НОП T_{cm} в расчетах изменялась в диапазоне от 150^0C до 250^0C, а начальная температура перерабатываемой ТПС T_0 изменялась в диапазоне от 30^0C до 60^0C. Теплофизические и физические характеристики ТПС при T_0 = 20^0C следующие:

$$d = 0.0001 м,\ \rho_1 = 1100 кг/м^3,$$

$$\rho_2 = 1000 кг/м^3,\ \lambda_1 = 0.11 вт/(м K),$$

$$\lambda_2 = 0.62 вт/(м K),\ \mu_1 = 1.893 (H \cdot C)/м^2,$$

$$\mu_2 = 0.001 (H \cdot C)/м^2,\quad c_{p_1} = 1115 дж/(кг\ K),$$

$$c_{p_2} = 4193 дж/(кг\ K).$$

Результаты численных расчетов по математической модели (1)–(9) для определения длины НОП l, необходимой для реализации процесса разделения фаз ТПС, в зависимости от варьирования значений режимных параметров α_2, T_0, T_{cm}, Q, приведены на рис. 2-4.

Результаты расчетов длины НОП, необходимой для реализации процесса переработки ТПС в целом отражены на графике, приведенном на рис. 3. Они подтверждают следующие закономерности. Увеличение величины T_0 приводит к уменьшению всей длины НОП. При этом, чем больше в ТПС содержание дисперсной фазы α_2, тем увеличение T_0 слабее влияет на уменьшение длины НОП. Проявление такой закономерности при увеличении в ТПС α_2 объясняется тем, что с ростом α_2 начинает превалировать третья зона, а на изменение длины НОП для третьей зоны вариация значений T_0 никакого влияния не оказывает.

Увеличение значения T_{cm} при постоянных значениях режимных параметров α_2, T_0, Q приводит к уменьшению длины НОП в целом. Эта закономерность, справедливая для всех трех зон процесса переработки ТПС в отдельности, остается справедливой и для всего процесса в целом.

Такие же рассуждения остаются справедливыми и в отношении закономерности заключающейся в увеличении длины НОП в целом с ростом значения Q при постоянных значениях параметров α_2, T_0, T_{cm}.

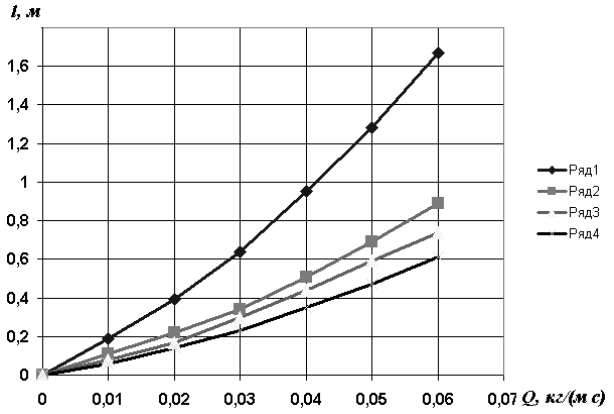

Рис.2 Зависимость длины рабочей поверхности l для второй зоны процесса переработки ТПС от расхода Q при T_o = 50°C, α_2 =0,09; Ряд 1 – $T_{ст}$ = 150°C; Ряд 2 – $T_{ст}$ = 200°C; Ряд 3 – $T_{ст}$ = 220°C; Ряд 4 – $T_{ст}$ = 250°C.

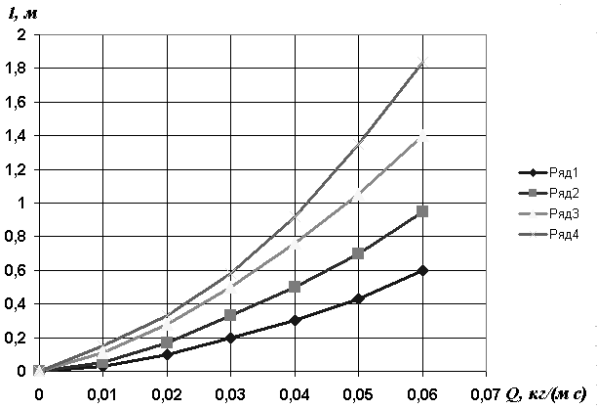

Рис.3 Зависимость длины рабочей поверхности l для третьей зоны процесса переработки ТПС от расхода Q при $T_{ст}$ = 250°C, Ряд 1 – α_2 =0,05; Ряд 2 – α_2 =0,09; Ряд 3 – α_2 =0,15; Ряд 4 – α_2 =0,18.

Что же касается зависимости длины НОП в целом от изменения α_2, то в данном случае приходится констатировать, что разным

зонам процесса соответствуют противоположные закономерности.

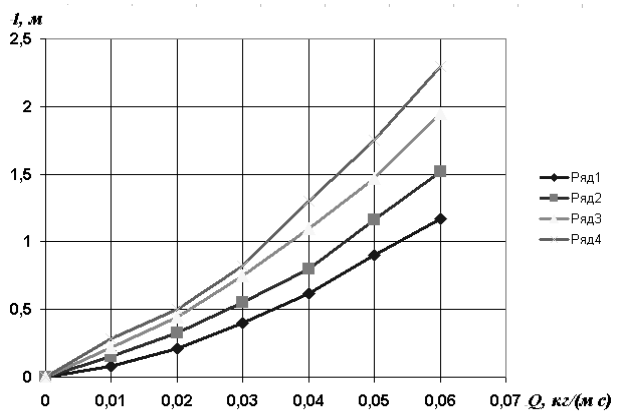

Рис.4 Зависимость длины рабочей поверхности ***l*** для процесса переработки ТПС в целом от расхода ***Q*** при $T_{ст}$ = 250°С, T_o = 60°С; Ряд 1 – α_2 =0,05; Ряд 2 – α_2 =0,09; Ряд 3 – α_2 =0,15; Ряд 4 – α_2 =0,18.

Для процесса переработки ТПС в целом наблюдается такая же закономерность, что и для третьей зоны процесса, но только более слабо выраженная. Более слабое увеличение длины НОП для процесса переработки ТПС в целом при увеличении α_2 по сравнению с третьей зоной процесса объясняется тем, что на эту тенденцию, присущую третьей зоне накладывается противоположная тенденция, присущая второй зоне при нейтральной тенденции, присущей первой зоне процесса. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке.

Из вышеизложенного можно сделать следующий вывод: при заданных значениях параметров α_2 и Q процесс разделения фаз ТПС необходимо вести при возможно более высоких значениях T_0 и $T_{ст}$ но при этом увеличиваются энергозатраты. Поэтому необходимо сформулировать задачу оптимальной организации процесса с учетом всех его параметров и производительности аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтайулы С., Антипов С.Т., Павлов И.О. Математическое моделирование массообмена при удалении влаги из фосфолипидных эмульсий в ротационно-пленочном аппарате // Тепловые процессы в технике. – 2012. – № 3. – С. 72-75.

   Altayuly S., Antipov S.T., Pavlov I.O. Mathematical modeling of mass transfer in removing moisture from the phospholipid emulsions in rotary film unit / / Thermal processes in the art. - 2012. - № 3. - P. 72-75.

2. Шиляев М.И., Толстых А.В. Гидродинамика и тепломассообмен пленочных течений в полях массовых сил и их приложения - М.: Изд-во ИНФРА-М, 2014.

   Shilyaev M.I.,Tolstih A.V. Hydrodynamics and heat transfer film flows in the fields of mass forces and their applications. -M. INFRA-M, 2014.

3. Ахмадиев Ф.Г., Фазылзянов Р.Р., Галимов Р.А. Математическое моделирование тонкослойного неизотермического течения двухфазных сред по проницаемым поверхностям // Теорет. основы хим. технологии. 2012. Т. 46. № 6. С. 620.

   Akhmadiev F.G., Fazylzyanov R.R., Galimov R.A. Mathematical modeling of thin layer of non-isothermal flow of two-phase flow along permeable surfaces // Teor. chemical basis. technology. 2012. T. 46. № 6. P. 620.