

Повышение эффективности теплообмена в процессе сушки фосфолипидных эмульсий подсолнечных масел в роторно-пленочных аппаратах

к.т.н. Алтайулы С. sagimbek@mail.ru

Воронежская государственная технологическая академия
г. Воронеж, Россия

В статье рассматривается повышение эффективности теплообмена в процессе сушки фосфолипидных эмульсий подсолнечных масел в роторно-пленочных аппаратах. Представлен анализ теплообмена в роторно-пленочных аппаратах с жестко закрепленными лопастями ротора. Теплообмен в основном зависит от гидродинамической характеристики конструкции лопасти ротора (d_p), угловой скорости вращения лопасти ротора ω , удельного теплового потока q , линейной плотности орошения Γ и теплофизических свойств жидкости. Определено, что увеличение скорости вращения лопасти ротора в роторно-пленочных аппаратах приводит к увеличению интенсивности теплообмена и испарению влаги из пленки продукта только до определенного предела. Это вызвано с одной стороны возрастанием вязкости жидкости, приводящей к увеличению толщины пленки и повышению ее термического сопротивления, и а с другой стороны увеличением гидродинамического сопротивления образовавшегося парового слоя над поверхностью пленки и препятствующему выходу паровой фазы влаги, как из пленки, так и из зоны нагрева продукта.

Ключевые слова: теплообмен, процесс сушки, фосфолипидные эмульсий, роторно-пленочный аппарат.

В масложировой промышленности в большом количестве производят так называемые фосфолипидные концентраты, являющиеся одним из ценных побочных продуктов, получаемых при первичной очистке подсолнечных масел, которые широко применяются в кондитерской, хлебопекарной, комбикормовой и других отраслях промышленности.

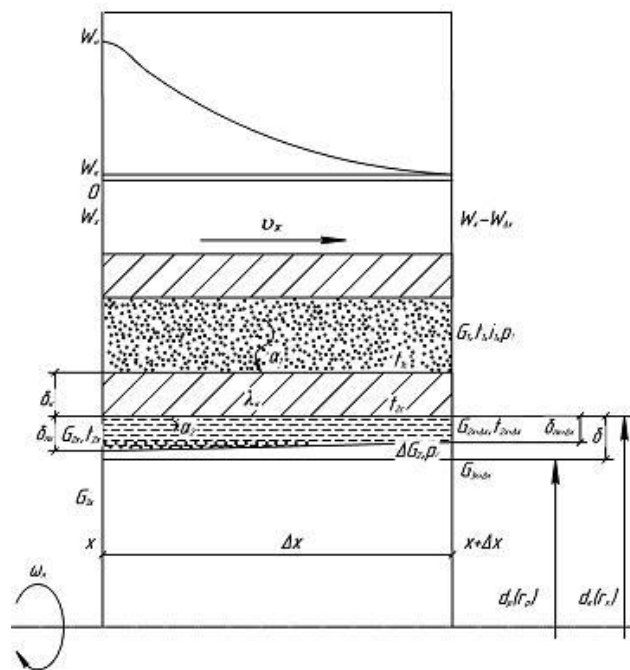
В процессе производства фосфолипидных концентратов одним из наиболее ответственных и продолжительных этапов является их сушка. Изыскание путей повышения эффективности процесса сушки и качества

готового продукта, а также разработка высокопроизводительных и высокоэффективных, но простых по конструкции сушильных аппаратов является актуальной задачей.

В настоящее время наиболее прогрессивными аппаратами для выпаривания жидкостей и сушки вязких, термолабильных материалов являются роторно-пленочные аппараты непрерывного действия.

Для высушивания фосфолипидной эмульсии подсолнечных масел используют горизонтальные, непрерывно действующие, роторно-пленочные сушильные аппараты [1, 2].

С целью анализа процесса сушки и выявления его основных закономерностей, позволяющих наметить основные направления развития данного процесса по пути повышения эффективности, была предложена схема теплообмена, представленная на рисунке.



Рисунок

Схема теплообмена процесса сушки фосфолипидных концентратов растительных масел в роторно-пленочном аппарате

На интенсивность процесса сушки в роторно-пленочных аппаратах влияет температура греющей поверхности t_2 , избыточное давление в аппарате p_2 , вязкость μ , плотность ρ и температура нагрева $t_{2x} \rightarrow t_{2x-\Delta x}$ продукта.

При этом интенсификация процесса возможна при всестороннем изучении гидродинамики, тепло- и массообмена, закономерностей физико-химической кинетики реальных процессов с опорой на исследования соответствующих дифференциальных уравнений переноса импульса, теплоты и массы в контактирующих фазах.

Согласно предложенной схеме (см. рисунок), в процессе сушки, центробежной силой лопастей ротора аппарата осуществляется распределение вязкой термолабильной фосфалипидной эмульсии в виде горизонтально расположенной цилиндрической тонкослойной кольцевой пленки (δ_n) [3].

Теплообмен в роторно-пленочных аппаратах с жестко закрепленным лопастным ротором в основном зависит от конструкции лопасти ротора (d_p), угловой скорости вращения лопасти ротора ω , удельного теплового потока q , линейной плотности орошения Γ и теплофизических свойств жидкости. Наложение на пленку турбулизующего воздействия со стороны лопасти ротора приводит к уменьшению критического значения $\Delta t_{кр}$, определяющего начало пузырькового кипения и интенсивность процесса тепломассообмена.

Интенсивность теплообмена при сушке фосфатидных эмульсий снижается в связи с уменьшением плотности вращающегося парового слоя, взаимодействующего с поверхностью жидкостной пленки. Возрастание вязкости жидкости приводит к увеличению плотности толщины пленки и повышению ее термического сопротивления.

От характеристик течения пленки, ее толщины и скорости движения в значительной мере зависят скорости протекания процесса сушки в аппарате. Движение термолабильных фосфолипидных эмульсии в виде тонкой кольцевой цилиндрической пленки в ротационно-пленочных аппаратах в вакууме способствует получению наиболее качественных продуктов при сушке.

Для рассматриваемого процесса критерия Рейнольдса движения пленки при турбулентном течении $Re_{пл} > 1600$, имеет вид

$$Re_{пл} = \frac{\Gamma 4 \delta \rho_{жс}}{\delta \rho_{жс} \mu_{жс}} = \frac{4\Gamma}{\mu_{жс}}. \quad (1)$$

Для одномерного движения жидкости под действием силы тяжести вдоль оси x , совпадающей с направлением потока, уравнение Навье-Стокса имеет вид

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\rho_{жс} g + \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{жс} \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

а уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

При установившемся сплошном движении жидкости $\partial u_x / \partial \tau = 0$ и $\partial u_x / \partial x = \partial^2 u_x / \partial x^2 = 0$ – при неизменном профиле скоростей в направлении движения. Сила тяжести уравновешивается силой вязкостного трения и $\partial p / \partial x = 0$. При движении жидкости в пленке составляющая скорости в нормальном направлении к стенке отсутствует и $u_y = 0$. Уравнение (2) существенно упрощается и принимает вид

$$\mu_{жс} \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = \rho_{жс} g. \quad (4)$$

Интегрирование уравнения (10) дает

$$u_x = -\frac{\rho_{жс} g}{2\mu_{жс}} y^2 + c_1 y + c_2. \quad (5)$$

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 определим из граничных условий: при $y = 0$, т. е. на поверхности стенки, $u_x = 0$; при $y = \delta$, т. е. на наружной поверхности стекающей пленки, $\sigma_\tau = -\mu_{жс} (\partial u_x / \partial y) = 0$ и, следовательно, $\partial u_x / \partial y = 0$. Здесь σ_τ – напряжение трения на границе жидкость-газ.

Из (5) имеем

$$u_x = \frac{\rho_{жс} g \delta^2}{\mu_{жс}} \left(\frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \frac{y^2}{\delta^2} \right). \quad (6)$$

Из (6) скорость на наружной поверхности стекающей пленки ($y = \delta$)

$$u_{max} = \frac{1}{2} \frac{\rho_{ж} g \delta^2}{\mu_{ж}} . \quad (7)$$

Средняя скорость по сечению пленки равна

$$v = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} u_x dy = \frac{1}{3} \frac{\rho g \delta^2}{\mu} . \quad (8)$$

Сопоставляя (7) с (8) легко заключить, что

$$u_{max} / v = 1,5 ,$$

что подтверждается экспериментально.

Используя зависимости (1) и (8), можно получить уравнения для толщины пленки δ и средней скорости движения пленки

$$\delta = \sqrt[3]{3\Gamma\mu_{ж} / (\rho_{ж}^2 g)} , \quad (9)$$

$$v = \sqrt[3]{\Gamma^2 g / (3\mu_{ж}\rho_{ж})} . \quad (10)$$

Характеристики турбулентного движения определяются совместным действием сил тяжести, вязкостного трения и поверхностного натяжения. Каждой плотности орошения соответствует определенная средняя скорость движения пленки продукта, определяемой по формуле (10).

При течении пленки жидкой продукции по цилиндрической кольцевой поверхности происходит турбулизация пограничного слоя за счет вращения лопастей ротора. При $Re_{пл} > Re_{кр}$ значения средней толщины пленки $\delta_{ср}$ для цилиндрической кольцевой поверхности трубы существенно зависят от зазора между лопастей ротора и внутренней поверхности цилиндрической трубы, вида лопастей, скорости вращения ротора и плотности орошения. Важнейшей характеристикой пленочного течения является соотношение сил, обуславливающих растекание жидкости по поверхности (инерционная сила, пропорциональная квадрату скорости движения жидкости), и сил поверхностного натяжения, стремящихся сократить свободную поверхность жидкости (они пропорциональны поверхностному натяжению σ). С понижением плотности орошения и скорости вращения лопастей ротора толщина пленки уменьшается и при определенном расходе жидкости на

поверхности образуются несмоченные (сухие) участки, т. е. стабильность пленочного течения нарушается. Минимальной плотности орошения $\Gamma_{мин}$ определяются следующими соотношениями:

$$\frac{\Gamma_{мин}}{\mu} = \left(\frac{\sigma \rho^{1/3}}{\mu^{4/3} n^{1/3}} \right)^{5/8} \quad \text{или} \quad \Gamma_{мин} = \frac{\sigma^{5/8} \mu^{1/6} \rho^{5/24}}{g^{5/24}}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что наибольшее влияние на $\Gamma_{мин}$ оказывает поверхностное натяжение. С ростом σ , μ , ρ значение $\Gamma_{мин}$ увеличивается.

Высокие значения степени выпаривания ϕ , которая представляет собой отношение количества испарившего продукта к его исходному количеству, в роторно-пленочных аппаратах, достигается при минимальном времени пребывания продукта в зоне нагрева и зависят от физико-механических и теплофизических свойств жидкости.

Для обеспечения стабильности движения пленки жидкости и исключения отсутствия участков пленки жидкости по всей длине ℓ и периметру $2\pi R$ аппарата, необходимо чтобы плотность орошения должна была быть выше минимально допустимой ($\Gamma > \Gamma_{мин}$). Время пребывания в ротационно-пленочном аппарате обрабатываемых термолабильных фосфолипидных эмульсий подсолнечных масел в зоне нагрева оказывает большее влияние на эффект термического разложения, чем температура нагрева. В этом случае обеспечить на практике, особенно в аппаратах, работающих при атмосферном давлении, условия $\Gamma > \Gamma_{мин}$ трудно, так как плотность орошения ограничивается гидравлическим сопротивлением. Также для аппаратов, работающих при атмосферном давлении свойственно не полное использование объема ротационно-пленочного аппарата (из-за низкого отношения F/V). При пониженном атмосферном давлении в том же поперечном сечении аппарата гидравлическое сопротивление снижается и применение роторно-пленочного аппарата, работающего при низком давлении, становится эффективным. Средняя толщина пленки жидкости ($\delta_{ж}$) в зазоре между лопастями и внутренней поверхностью корпуса аппарата δ зависит от угловой скорости вращения лопасти ротора ω и возрастает с ее

увеличением, а также с изменением вязкости фосфатидной эмульсии по длине аппарата. Зная значения динамической вязкости по длине аппарата в зависимости температуры, влажности и давления, скорости вращения лопасти ротора, теплофизических свойств фосфалипидной эмульсии подсолнечных масел, а так же плотности орошения можно определить среднее пребывание жидкости в аппарате. В результате исследований выявлено, что продольное перемешивание уменьшается с увеличением числа лопастей и окружной скоростью их вращения и несколько возрастает по мере удаления от места входа жидкости. Так как средняя толщина пленки жидкости меньше ширины зазора между лопастями и внутренней стенкой корпуса аппарата δ , воздействие лопасти ротора на толщину пленки происходит через паровое или газовое кольцо. На поверхности пленки жидкости перед вращающейся лопастью образуется волна, перемещающаяся по цилиндрической поверхности со скоростью, соответствующей окружной скорости вращения лопасти ротора. Непосредственно за лопастью располагается зона высокой турбулентности, обеспечивающая интенсивное перемешивание продукта по толщине пленки жидкости. Расход энергии на вращение ротора (кВт на 1 м^2 поверхности нагрева) для создания жидкостной пленки, а также на перемещение вдоль аппарата и перемешивание продукта возрастает с увеличением скорости вращения. Усредненная толщина пленки $\delta_{\text{ж}}$ представляет сумму двух величин - толщину пленки в «спокойных» зонах $\delta_{\text{ж1}} = 0,75 \delta$ и толщину пленки, вычисляемая путем деления суммарной площади сечения жидкостных волн на смоченный периметр аппарата $2\pi R$. Процесс теплообмена в пленке продукта с целью испарения влаги с ее поверхности в роторно-пленочных аппаратах с жестко закрепленным лопастным ротором в большей степени зависит от гидродинамической характеристики (определяемой эффективным числом критерия Рейнольдса - $Re_{\text{эф}}$) [4].

Таким образом, увеличение скорости вращения лопасти ротора в роторно-пленочных аппаратах приводит к интенсивности теплообмена и

испарения влаги из пленки продукта только до определенного предела. Данный предел вызван с одной стороны возрастанием вязкости жидкости, приводящей к увеличению толщины пленки и повышению ее термического сопротивления, а с другой стороны увеличением гидродинамического сопротивления образовавшегося парового слоя над поверхностью пленки и препятствующему выходу паровой фазы влаги, как из пленки, так и из зоны нагрева продукта.

Список литературы

1. Алтайулы, С. Интенсификация процесса сушки фосфатидных эмульсий подсолнечных масел в ротационно-пленочном аппарате [Текст] /С. Алтайулы // Сборник тезисов Второго международного конгресса «ЕвразияБио -2010». Москва, 13-15 апреля 2010 г./ под ред. Р.Г. Василева. - М.: «Издательство «Копиринг», 2010. – 436 с.-С.10-12.
2. Патент на полезную модель РФ №99987. Заявка №2010110753/05, 22.03.2010 положительное решение от 06.07. 2010 г. МПК В О1 D 1/22 (2006.01) Цилиндрический ротационно-пленочный аппарат [Текст] /С. Алтайулы, С.Т. Антипов, С.В. Шахов // опубл. в Бюл. №34. 10. 12. 2010. .- 4 с.: ил.
3. Алтайулы, С. Анализ процесса сушки фосфолипидных концентратов растительных масел с целью его интенсификации в роторно-пленочном аппарате [Текст] /С. Алтайулы // Международный научно-технический семинар к 100 летию А.В.Лыкова «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов», (10-12 мая 2010 года) [Текст]: материалы семинара; Фед. агенство по образованию, ГОУ ВПО «ВГЛТА». - Воронеж, 2010.579с.-С.249-251.
4. Бабак, В.Н. Совместный перенос теплоты и импульса в двухфазных пленочных системах при пониженном давлении [Текст] / В.Н. Бабак, Т.Б.Бабак, Л.П. Холпанов // Теор. основы хим.технол.-2003.-Т.37.-№4.- С.339-350.

Improving of the efficiency of heat transfer in the drying process of phospholipid emulsion of sunflower oil in the rotary-film apparatus

Ph.D. Altaiuly S. sagimbek@mail.ru

Voronezh State Technological Academy

Voronezh, Russia

The article deals with improving of the efficiency of heat transfer in the drying process of phospholipid emulsion of sunflower oil in the rotary-film apparatus. Presented by the analysis of heat transfer in a rotary-film apparatus with rigid rotor blades. Heat transfer depends largely on hydrodynamic characteristics of the design rotor blades (d_p), the angular velocity of the rotor blades ω , the specific heat flux q , the linear density of irrigation Γ and thermal properties of liquids. It is determined that the increase in the rate of rotation of the rotor blades of the rotary-film apparatus leads to an increase in the intensity of heat transfer and evaporation of moisture from the film of the product only to a certain limit. This is caused on the one hand by increasing of the viscosity, leading to an increasing in film thickness and improving its thermal resistance, and on the other hand an increasing in hydrodynamic resistance of the resulting vapor layer above the surface of the film and prevents the vapor phase moisture from both the film and from the heating zone product.

Keywords: heat transfer, the drying process, phospholipid emulsions, rotary-film apparatus.