

УДК.665.937.6:66.084

В.И. ПогонецДальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДИАПАЗОН
СУЩЕСТВОВАНИЯ КИПЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО СЛОЯ
ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ АГАРА ПРИ СУШКЕ**

Проведены исследования сушки частиц агара на установке со взвешенно-закрученными потоками. Получены положительные результаты сушки этого продукта и выявлены характерные особенности гидродинамики процесса, скорости витания частиц агара и коэффициенты гидравлического сопротивления слоя.

Ключевые слова: исследования, сушка, гидродинамика, инертные частицы, агар.

V.I. Pogonets**HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS AND THE RANGE OF THE EXISTENCE
OF A SWIRLING FLUIDIZED LAYER OF DISPERSED PARTICLES
OF AGAR DURING DRYING**

Studies of drying of the particles of agar at the facility of weighted swirling flows have been advanced. Positive results of drying of the product and identified characteristics of hydrodynamic of the process, speed of the soar of the particples of agar and the coefficients of hydraulic resistance of the layer have been obtained.

Key words: research, drying, boiling layer, hydrodynamics, inert particles, agar.

Гидродинамическая сущность процесса кипящего слоя, в том числе с закрученными потоками, заключается в прохождении через слой продукта, расположенного на газораспределительной решетке, потока воздуха, нагретого до требуемой температуры.

Неподвижный слой инертных пластинок фторопласта с нанесёнными на них частицами агара переходит в кипящее состояние, когда средняя по времени подъёмная сила уравновешивает вес этих пластинок с частицами:

$$f_n = m_{ч.а.} \cdot q, \quad (1)$$

где f_n – подъёмная сила, действующая на пластинку инертного материала; $m_{ч.а.} \cdot q$ – вес пластинки фторопласта с нанесённым агаром.

Процесс гидродинамики кипящего слоя определяется [4,5] характером изменения сопротивления слоя в зависимости от скорости фильтрации теплового агента и удельной нагрузки частиц с агаром на газораспределительную решётку $\Delta P = f\left(\omega, \frac{G}{F_0}\right)$ и изменением высоты кипящего слоя продукта в зависимости от скорости воздуха и высоты неподвижного слоя $H = f(\omega, H_0)$.

Высота кипящего слоя в расширенном состоянии характеризует геометрическую высоту поверхности теплообмена. Поэтому знание перечисленных параметров важно для правильной организации процесса сушки дисперсных частиц агара в кипящем слое, определения его структуры и границ существования.

В отличие от неподвижного слоя гидравлическое сопротивление кипящего слоя не зависит от скорости воздуха и определяется для аппаратов постоянного поперечного сечения равенством сил гидродинамического давления и сил противодействующих кипению частиц [1, 3], вызываемых трением потока теплового агента о стенки камеры, его движением между частицами, соударением частиц между собой, а также поддержанием слоя твердых частиц во взвешенном состоянии:

$$\Delta P = \frac{G}{F_0} = (\rho_M - \rho_0)(1 - \varepsilon_0)qH_0, \quad (2)$$

где ΔP – гидравлическое сопротивление слоя, Н/м²; ρ_M, ρ_0 – плотность материала и теплового агента, кг/м³; ε_0 – порозность неподвижного слоя; H_0 – высота неподвижного слоя, м; G – масса твёрдой фазы, кг; F_0 – площадь поперечного сечения сушильной камеры, м².

Графически процесс псевдооживления изображается зависимостью изменения гидравлического сопротивления от скорости теплового агента. Процесс перехода неподвижного слоя пластинок фторопласта с частицами агара в кипящий на кривой псевдооживления отражается наличием резкого увеличения давления и зависит от состояния поверхности твёрдых частиц, их формы и плотности слоя. Наличие пика давления ΔP_{\max} свидетельствует о том, что необходимо затратить дополнительную энергию потока на преодоление сил сцепления частиц, которая составляет для хорошо сыпучих материалов 1,5-5 % от энергетических затрат установившегося процесса кипения [1]. Ввиду того, что дополнительные затраты энергии при переходе от плотного слоя в кипящий не поддаются строгому аналитическому расчету, то учитываются они коэффициентом $R_{кр}$, который определяется опытным путём для конкретного сырья, подвергаемого сушке.

А.С. Гинзбург и др. [2] на основе опытов установили, что на величину коэффициента $R_{кр}$ оказывает влияние плотность слоя частиц, влажность материала и высота неподвижного слоя.

Нами проведены исследования гидродинамики процесса и на основании полученных данных построены графические зависимости $\Delta P = f(\omega)$.

Проведя анализ этих полученных графических зависимостей, установили, что с увеличением удельной нагрузки слоя с частицами агара на газораспределительную решётку гидравлическое сопротивление его возрастает пропорционально скорости воздуха в степени k . При достижении максимального давления, соответствующего критической скорости, слой пластинок с агаром переходит в кипящее состояние. Значения максимального давления, характеризующиеся коэффициентом $R_{кр}$, полученные нами экспериментальным путём в диапазоне исследуемых удельных нагрузок на газораспределительную решётку, колеблются в пределах 1,015-1,06. Незначительные отклонения коэффициента $R_{кр}$ от единицы, полученные для частиц агара, по сравнению с данными исследований в работе [2] для зерна пшеницы, указывают на зависимость $R_{кр}$ от свойств частиц и их гранулометрического состава. При этом для полидисперсных мелкокристаллических продуктов наблюдается постепенный переход в кипящее состояние часто без ярко выраженного пика давления.

Увеличение скорости воздуха выше критического значения приводит к увеличению высоты слоя при постоянном значении гидравлического сопротивления. Переход от режима фильтрации к кипящему состоянию сопровождается появлением в слое газовых пузы-

рей, которые барботируют через слой, приводя к колебаниям концентрации и порозности по объёму слоя. При этом гидравлическое сопротивление слоя колеблется около некоторого среднего значения, которое меньше теоретического, определяемого величиной удельной нагрузки $\frac{G}{F_0}$ на газораспределительную решётку и определяется по формуле

$$\Delta P = R_{кип.} \frac{G}{F_0}. \quad (3)$$

Коэффициент $R_{кип.}$ в уравнении (3) является характеристикой равномерности кипения, так как последняя не поддается точной количественной оценке. Совместное рассмотрение равномерности кипения пластинок фторопласта и дисперсных частиц агара с его однородностью позволило оценить качество псевдоожижения и получить уравнение для гидравлического сопротивления кипящего слоя:

$$\Delta P = (0,8 \div 0,95) \frac{G}{F_0}. \quad (4)$$

Приближение значений коэффициента $R_{кип.}$ к единице свидетельствует об улучшении равномерности кипения с увеличением удельной нагрузки агара на решетку в исследуемом интервале за счет уменьшения каналаобразования в слое.

Переход пластинок фторопласта с частицами агара в кипящее состояние происходит постепенно и характеризуется определенным интервалом скоростей подаваемого под газораспределительную решётку нагретого теплоносителя.

Кипящий слой частиц агара существует в определённом диапазоне скоростей подводимого теплоносителя. Знание этого диапазона необходимо для технологического сопровождения процесса сушки, для конструктивных расчетов сушильных аппаратов, а также для определения параметров пневмотранспортирования высушенного продукта.

Неподвижный слой дисперсных частиц агара в сушильной камере переходит в кипящее состояние при некотором значении скорости начала псевдоожижения – некоторой критической скорости $\omega_{кр.}^*$ с нижним пределом. Верхним пределом существования кипящего слоя является критическая скорость $\omega_{кр.}^{**}$. Переход слоя агара в кипящее состояние в начальный момент сопровождается кипением мелких частиц и последующим их воздействием на крупные частицы. Замечено, что увеличение количества мелких частиц в продукте приводит к увеличению сопротивления слоя из-за снижения порозности и уменьшения скорости ожижения вследствие обмена количеством движения между частицами различного размера. В связи с этим кипение полидисперсных частиц агара происходит при меньшем значении скорости теплового агента, чем при кипении его крупной фракции.

По литературным источникам известно два метода для определения скорости начала кипения, эти методы подробно изложены в монографиях, касающихся сушки материалов. Проведя их анализ по определению критической скорости начала кипения различных материалов, скорости витания частиц и диапазона существования кипящего слоя, можно утверждать, что это приемлемо для монодисперсного или узкого гранулометрического состава. Для полидисперсных продуктов процесс кипения осложняется, так как он начинается при меньшем значении скорости подаваемого теплового агента по сравнению со скоростью начала кипения слоя, состоящего из наиболее крупных его частиц.

Мы провели эксперименты по выявлению начала кипения частиц агара с различной влажностью, с различной начальной высотой слоя (50-250 мм) и соответствующих удельных нагрузок на газораспределительную решетку (350-1750 Н/м²). По результатам исследований построены графические зависимости. Анализ этих результатов свидетельствует о смещении максимального гидравлического сопротивления слоя в сторону больших значений скорости теплового агента с увеличением удельной нагрузки слоя агара на газораспределительную решётку. В связи с тем, что переход полидисперсного продукта в кипящее состояние определяется интервалом скорости, соответствующей началу переходного режима и критической скорости начала кипения продукта, происходит смещение их в сторону больших значений с увеличением удельной нагрузки.

Скорость начала кипения частиц агара определялась по кривым обратного хода процесса, полученным и построенным по экспериментальным данным. При этом её значение для каждой начальной высоты слоя имеет [1] постоянную величину, не зависящую от предшествующего состояния слоя. Постоянное уменьшение скорости теплового агента характеризуется переходом кипящего слоя в неподвижный, при этом отсутствует пик давления и кривая в зоне неподвижного слоя располагается ниже графика прямого хода.

Полученные экспериментальные данные обрабатывали с использованием графического метода в логарифмической системе координат в виде зависимости изменения гидравлического сопротивления $\Delta P_{сл.}$ от скорости ω теплового агента, подаваемого под газораспределительную решётку. Это позволило установить особенности поведения слоя частиц агара – наличие режимов фильтрования, переходного и полного псевдооживления. В зависимости от начальной высоты неподвижного слоя каждый режим характеризуется определённой скоростью теплового агента, которая изменяется от скорости начала переходного режима ω_n до критической скорости начала кипения $\omega_{кр.}^*$ и зависит от величины частиц агара и их взаимодействия.

Изменение гидравлического сопротивления слоя в зависимости от изменения скорости теплоносителя в переходном режиме происходит по экспоненциальному закону. Исходя из граничных условий равенства гидравлического сопротивления слоя в точке, соответствующей значению начальной критической скорости теплового агента – $\Delta P_n = \Delta P_{кр.}^*$, оно может быть представлено зависимостью критерия Эйлера, являющегося характеристикой соотношения сил инерции и сил давления в подобных потоках, и критерия Рейнольдса, учитывающего меру сил инерции и сил трения в движущейся среде:

$$E_u = c \cdot R_e^{-k} . \tag{5}$$

Постоянная интегрирования c и показатель степени k получены при графической обработке результатов экспериментальных данных.

При обработке экспериментальных данных статистическими методами получено критериальное уравнение (6), характеризующее изменение диапазона скоростей переходного режима и начала кипения частиц агара от начальной высоты слоя от 50 до 250 мм.

$$E_u = 455 \left(\frac{H_0}{d_s} \right)^{1,034} R_e^{-1,53} , \tag{6}$$

при $R_e = 4,75 - 17$; $\frac{H_0}{d_s} = 110 - 635$.

Наряду со значениями критической скорости начала кипения важный практический интерес представляет коэффициент гидродинамического сопротивления полидисперсного слоя агара в переходной области. Его значение определено аналитическим путём по экспериментальным данным, полученным при исследовании критической скорости начала кипения продукта, и выражается обобщённым уравнением:

$$\xi = 895 \left(\frac{H_0}{d_s} \right)^{0,025} R_e^{-1,53}, \quad (7)$$

при $R_e = 4,75 - 17$; $\frac{H_0}{d_s} = 110 - 635$.

Скорость витания определяется из условия равновесия сил при свободном падении частиц агара:

$$G = R, \quad (8)$$

где G – сила тяжести частицы агара, кг; R – сила сопротивления воздуха движению частицы, кг.

При математической обработке полученных данных установлена зависимость скорости витания частиц агара от эквивалентного диаметра:

$$\omega_{\text{вит.}} = 1,8 d_s^{0,65}, \quad (9)$$

где d_s – эквивалентный диаметр частиц агара, определённый по формуле [1, с. 88].

Полученная зависимость удобна для практических целей и может применяться для определения скорости витания частиц агара полидисперсного состава, что весьма важно при расчёте конструктивных элементов сушильных аппаратов, определения условий пневмотранспорта, а также при расчёте пылеулавливающих устройств циклонов и осадительных камер.

Список литературы

1. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
2. Гинзбург А.С., Резчиков В.А. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое. – М.: Пищ. пром-сть, 1970. – 196 с.
3. Ким Э.Н., Лаптева Е.П., Климова Е.Ю. Исследование процесса сушки гидробионтов / Исследования Мирового океана: материалы Междунар. науч. конф. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2008. – С. 616.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
5. Погонец В.И. Сушка морепродуктов во взвешенно-закрученных потоках. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2000. – 193 с.

Сведения об авторе: Погонец Владимир Ильич, доктор технических наук, доцент, профессор, e-mail: pogonetsvi@mail.ru.