

УДК 66.096.5

Методика расчета агрегатов со встречно закрученными потоками инертных тел для сушки куриных яиц

Д-р техн. наук В.Е.КУЦАКОВА, д-р техн. наук С.В.ФРОЛОВ, Г.И.МЕРЕМИНСКИЙ, канд. техн. наук Т.Е.БУРОВА
Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

Studies of the drying processes of the liquid and paste products in a spouted bed of inert particles («inerts») have shown that the most difficult problem, which limits the productivity of such an apparatus, is that of removing the dry product from the surface of the inerts.

We suggest to solve this problem by developing a new type of interaction between the inerts and the spouted drying agent (air) in the apparatus with curled counter-current streams. The drying material is applied in a thin film on the inert's surface by a spray nozzle in the lateral wall of the apparatus. In this way, the inerts surface is cleaned by means of particle collision in the curled counter-current streams. The crushed product proceeds to a cyclone, separates from the air and leaves the apparatus. For the describing the drying process in such an apparatus it is necessary to describe the mechanical grinding of the dry products film, which determines the average thickness of the film and, consequently, the filling of the unit with the product (which depends on the parameters of the process).

Сушка меланжа на инертных телах, представляющих собой кубики фторопласта с ребром 5...7 мм, в аппаратах со встречно закрученными потоками инертных тел (СВЗП) является наилучшим решением проблемы переработки куриных яиц на местах.

Аппараты СВЗП (рис. 1) обладают малой металлоемкостью, низкими удельными энергозатратами, простотой обслуживания [1].

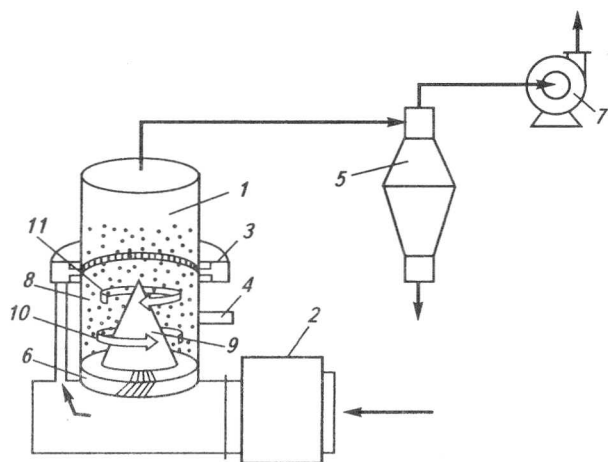


Рис. 1. Схема сушильной установки со встречно закрученными потоками инертных тел:

- 1 — сушильная камера; 2 — теплогенератор; 3 — верхняя газораспределительная решетка; 4 — пневматический распылитель; 5 — циклон; 6 — нижняя газораспределительная решетка; 7 — вентилятор; 8 — инертные тела; 9 — конус; 10, 11 — соответственно нижний и верхний слои закрученных инертных тел

Исследования, связанные с сушкой жидких и пастообразных продуктов, в частности куриных яиц, во взвешенных слоях инертных тел (инерта), показывают, что наиболее сложной проблемой, лимитирующей производительность подобных аппаратов, является очищение поверхности частиц инерта от высохшего продукта. Используемые для этого приемы (взаимодействие потока с различными элементами конструкции сушильной камеры) не позволяют эффективно решить эту задачу. Это приводит к тому, что подобные аппараты имеют производительность намного ниже теоретически возможной.

Решение проблемы было найдено в принципиально новом типе взаимодействия инертного носителя и оживающего сушильного агента в аппарате со встречно закрученными потоками (рис. 1). Высушиваемый материал в виде гидроаэрозоля подается в аппарат через форсунку в боковой стенке цилиндрического корпуса и напыляется на инертные частицы, движущиеся во взвешенном слое, закрученном вокруг конической вставки и формируемом газораспределительной решеткой с наклонными лопатками, установленными под углом 21...34° к горизонту внизу аппарата. Пленка материала на поверхности инертного носителя обезвоживается и по достижении конечного влагосодержания скалывается или истирается. Для повышения эффективности скалывания материала в верхней части аппарата установлена вторая газораспределительная решетка, создающая поток воздуха, закручивающий второй слой инертного носителя противоположно основному. Высота установки верхней кольцевой решетки равна 2...2,5 радиусам аппарата относительно нижних лопаток. Отношение расходов теплоносителя через верхний и нижний вводы

составляет 0,35...0,4. Такие геометрические параметры и соотношения расходов позволяют сформировать струи газа, в которых частицам инерта во вращающихся потоках придается максимальная кинетическая энергия в зоне взаимодействия при минимальных энергетических затратах. Таким образом, очищение поверхности частиц инерта происходит за счет их столкновения между собой в процессе движения во встречно закрученных взвешенных слоях. Сколотый материал в режиме пневмотранспорта направляется в циклон, где отделяется и поступает на выгрузку.

Наибольшую сложность в подобном аппарате представляют не тепло- и массообменные, а механические процессы. Собственно кинетика сушки материала достаточно проста, поскольку в тонких слоях продукта на поверхности инертных частиц сушка практически всегда осуществляется в первом периоде, и рассчитать продолжительность процесса несложно. Поверхность инертной частицы может не освобождаться от продукта за промежуток времени между последовательными нанесениями его на поверхность частицы. В этом случае пленка свежего продукта наносится на поверхность, покрытую уже обезвоженной пленкой, нанесенной ранее, и окончательная толщина пленки продукта на инерте может оказаться недостаточно малой для того, чтобы сушка происходила в первом периоде. Однако, поскольку влага удаляется только из последнего покрытия, диффузионным сопротивлением его можно пренебречь. Тогда кинетическое уравнение, описывающее процесс испарения, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\beta(1+U_0)}{mR_w(t_s+273)}[p_0(\theta, U) - p_a], \quad (1)$$

где U , U_0 – текущее и начальное влагосодержание продукта, кг влаги/кг продукта;

τ – текущее время, с;

β – коэффициент массоотдачи, м/с;

R_w – газовая постоянная для водяного пара, Дж/(кг·К);

t_s – средняя температура воздуха вблизи поверхности частиц, К;

p_a , p_0 – парциальное давление паров воды в воздухе вблизи поверхности частиц, Па;

θ – средняя температура инертных частиц в аппарате, К;

m – масса сухого продукта, удаленного с единицы поверхности инертных частиц, кг/м².

Теплообмен между продуктом и воздухом, определяющий температурный режим процесса (температура воздуха на входе и выходе, а также температура продукта), тоже поддается аналитическому расчету. Результаты расчетов для куриных яиц представлены на графике (рис. 2). Продолжительность сушки продукта в аппарате может быть определена из уравнения (2), полученного интегрированием уравнения (1):

$$\tau_d = \frac{kmR_w(t_s+273)}{\beta(1+U_0)} I(\theta, p_a); \quad (2)$$

$$I(\theta, p_a) = \int_{U_0}^{U_f} \frac{dU}{p_0(\theta, U) - p_a},$$

где U_f – конечное влагосодержание продукта;

k – количество нанесенных слоев.

Однако теоретически уравнение может быть решено лишь при количестве слоев, равных единице. Это связано с тем, что количество слоев или связанное с ним время пребывания продукта в аппарате – величина не постоянная. Она зависит от режимных параметров процесса и адгезионных свойств материала по отношению к поверхности инерта. Для расчета интеграла $I(\theta, p_a)$ (2) необходимо найти функцию $p_0(\theta, U)$ для конкретного продукта. Для этого нужно провести серию изопиестических экспериментов. На рис. 3 представлены значения интеграла I при начальном влагосодержании $U_0 = 3$ и конечном $U_f = 0,06$ кг/кг продукта и различных значениях p_a .

Следует отметить, что устойчивость процесса сушки в агрегатах обеспечивается лишь в том случае, когда про-

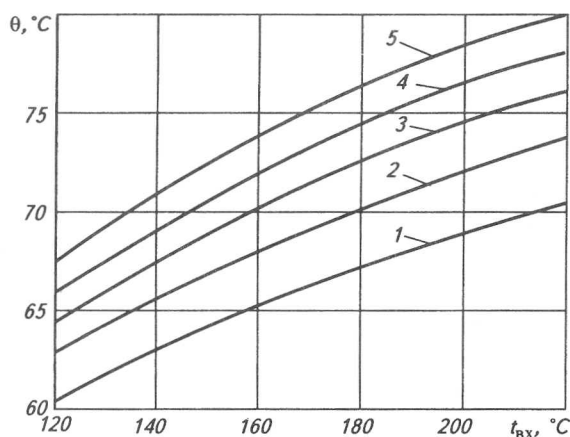


Рис. 2. Зависимость температуры слоя продукта от температуры теплоносителя на входе в аппарат (t_s) при различных температурах теплоносителя на выходе ($t_{вх}$): 1 – 80 °C; 2 – 90 °C; 3 – 100 °C; 4 – 110 °C; 5 – 120 °C

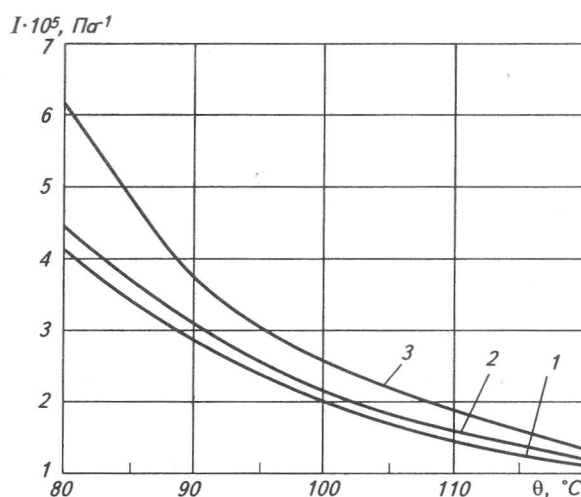


Рис. 3. Зависимости интеграла I от θ при $U_0=3$ и $U_f=0,06$ и различных значениях p_a , рассчитанных для куриных яиц: 1 – $1 \cdot 10^3$ Па; 2 – $3 \cdot 10^3$ Па; 3 – $5 \cdot 10^3$ Па

должительность сушки пленки τ_c , одновременно нанесенной на поверхность инертной частицы, не превышает интервала времени $\tau_{ц}$ между последовательными орошениями частицы в факеле распыла продукта. Таким образом, полагаем $\tau_c = \tau_{ц}$.

Если среднее время пребывания продукта в аппарате τ_0 , найденное экспериментально, оказывается больше времени сушки единичного (единовременно нанесенного) слоя $\tau_c = \tau_{ц}$, то скалываемая пленка состоит из нескольких слоев, среднее количество которых k определяется соотношением

$$k = \tau_0 / \tau_c.$$

Время пребывания продукта в агрегате можно определить из следующего соотношения:

$$\tau_0 = \frac{G_{пр}}{G} = \frac{V_{ар} \Psi \rho_{пр}}{G} = \frac{V_{пр}}{V_{ар}} \frac{V_{ар} \rho_{пр}}{G}, \quad (3)$$

где $G_{пр}$ – масса продукта, единовременно находящегося в агрегате, кг;

G – производительность агрегата по сухому продукту, кг/с;

$\rho_{пр}$ – плотность сухого продукта, кг/м³;

$\Psi = V_{пр}/V_{ар}$ – удельное объемное заполнение агрегата продуктом, является функцией режимных параметров процесса и удельного объемного заполнения инертной насадкой $V_{и}/V_{ар}$ (отношение инертных частиц к объему рабочей зоны сушильной камеры агрегата).

Эксперименты по определению этой функциональной зависимости проводили в агрегатах СВЗП (исследовали три типоразмера агрегатов). В качестве инертных тел в агрегаты загружали кубики из фторопласта с ребром 7 мм. В агрегатах обезживляли куриный меланж с начальным влагосодержанием $U_0 = 3$ кг/кг продукта.

После установления стационарного режима (о чем свидетельствовало постоянство регистрируемых температур) из работающего агрегата отбирали пробы фторопластовых кубиков, покрытых пленкой продукта, и определяли отношение массы отмытой пленки к массе фторопластовых кубиков. С учетом массы инертных тел в агрегате рассчитывали массу и объем продукта, единовременно пребывающего в агрегате.

В качестве режимных параметров, однозначно определяющих $V_{пр}/V_{ар}$, выбрали среднюю по сечению агрегата скорость воздуха, температуру теплоносителя на входе $t_{вх}$ и на выходе $t_{вых}$ из агрегата и $V_{и}/V_{ар}$. Результаты экспериментов представлены в виде номограммы (рис. 4), позволяющей определить удельное объемное заполнение агрегата продуктом при известном объеме рабочей камеры. На рис. 4 пунктирной линией показан ключ к номограмме. При максимальном заполнении агрегата продуктом область устойчивой работы агрегата ограничена.

В случае экспериментально найденных значений $V_{пр}$, G для агрегата объемом $V_{ар}$ уравнения (2) и (3) могут быть решены относительно комплекса $k_n \Phi_n / \beta$. На рис. 5 представлена зависимость этого комплекса от режимных параметров процесса. Как видно из рис. 5, комплекс $k_n \Phi_n / \beta$ практически не зависит от температурных режимов сушки в области устойчивой работы агрегата, но существен-

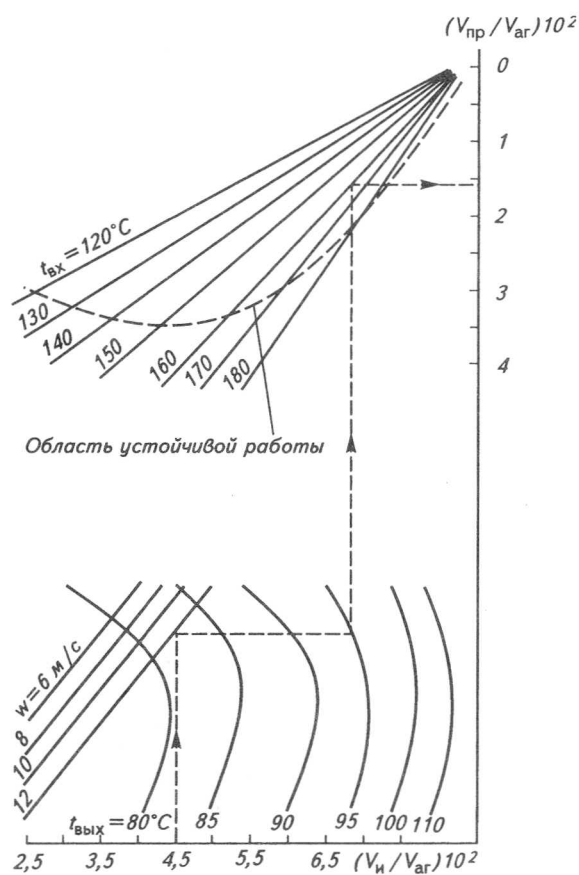


Рис. 4. Номограмма для определения удельного объемного заполнения агрегата продуктом

но зависит от скорости теплоносителя и удельного объемного заполнения аппарата продуктом. Зависимость $k_n \Phi_n / \beta$ носит экстремальный характер. Согласно формуле (2) минимуму функции соответствует минимальное время нахождения продукта в аппарате, обеспечивающее доведение продукта до заданного конечного влагосодержания.

Найдя время пребывания продукта в агрегате по формуле (2), можно по (3) при заданной производительности

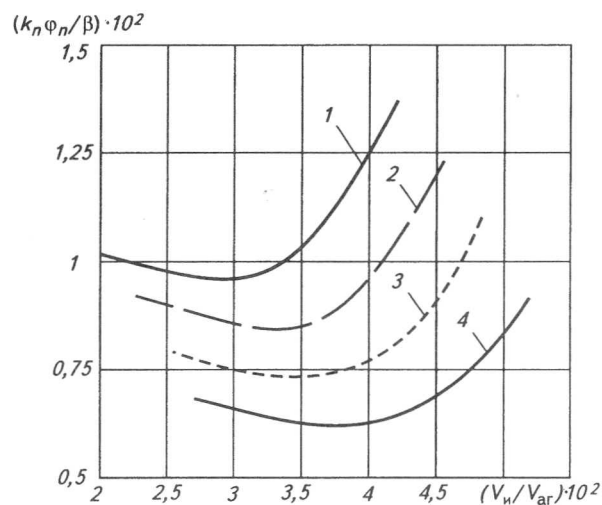


Рис. 5. Зависимость комплекса $k_n \Phi_n / \beta$ от удельного объемного заполнения агрегата инертной насадкой при разных скоростях теплоносителя на входе ($w_{вх}$, м/с): 1 – 6; 2 – 8; 3 – 10; 4 – 12

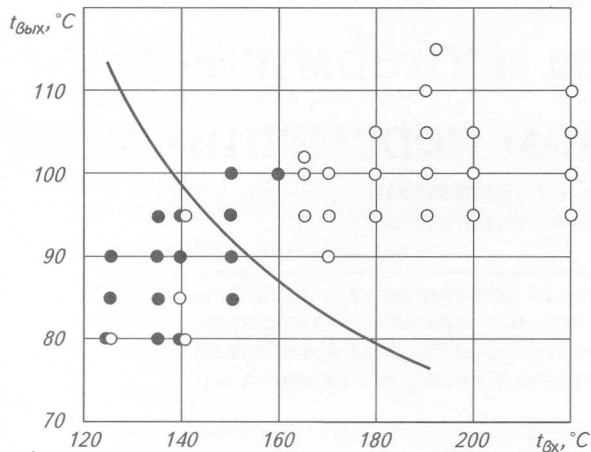


Рис. 6. Растворимость яичного порошка, полученного при различных температурных режимах работы аппарата:
 ° — растворимость меньше 85 %; • — растворимость больше 85 %; кривая соответствует $\theta = 67^\circ\text{C}$

агрегата определить его объем или при данном объеме агрегата — его производительность.

Основным критерием качества сухого яичного порошка является растворимость, которая согласно ГОСТу не должна быть ниже 85 % [2]. Результаты исследований представлены в виде зависимости растворимости яичного порошка от температуры теплоносителя на входе и выходе из агрегата (рис. 6). Как видно из рис. 6, существует область температур $t_{BX} - t_{BYX}$, обеспечивающая необходимое качество готового продукта.

Наиболее экономичный температурный режим для получения готового продукта высокого качества $t_{BX} = 150...160^\circ\text{C}$ и $t_{BYX} = 90...95^\circ\text{C}$. Таким образом, при сушке термолабильных пищевых продуктов должно быть найдено дополнительное ограничение по тепловым и динамическим параметрам процесса, обеспечивающее требуемое ГОСТом качество готового продукта.

Список литературы

1. А.с. РФ № 14648 «Устройство для сушки жидких материалов» /В.Е. Куцакова, С.В. Фролов, Г.И. Мереминский, 2000.
2. ГОСТ 2858 – 82. Порошок яичный. Технические условия.