

УДК 633.854.78

Масштабирование аппарата со встречно закрученными струями инертного носителя для сушки агар-агара

Д-р техн. наук, проф. Куцакова В.Е., Намлиев Ю.В.,

Панина Т.С., Федорова А.М.

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Рассмотрен сушильный агрегат с закрученными струями инертных носителей. Предназначен для сушки агар-агара. Рассмотрены условия масштабирования внутренних узлов аппарата. Дана взаимосвязь между габаритными размерами аппарата и углом ориентации нижних сопел. Дана зависимость диаметра аппарата от расхода теплоносителя, высоты расположения верхних сопел и скорости витания инертных частиц. Показано, что для соблюдения постоянства скорости частиц в верхнем сечении агрегата высота расположения верхних сопел должна уменьшаться при увеличении диаметра агрегата. При этом для более тяжёлых частиц необходимо выбирать агрегат с меньшим радиусом при постоянстве всех остальных конструктивных параметров. Дана корреляция расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: аппарат, встречно закрученные потоки, масштабирование, внутренние узлы.

Scaling of the device with opposite twirled streams the inert carrier for drying an agar agar

D.Sc., prof. Kutsakov V. E., Namliyev Yu.V.,

Panina T.S., Fedorova A.M.

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

A drying unit with the swirl jets of inert supports is considered. It is designed for drying of agar-agar. The conditions for the scaling of internal nodes of the machine are considered. The relationship between the overall dimensions of the unit and the lower nozzles orientation angle is given. The dependence of the device diameter on the coolant flow, the height of the upper nozzles and the terminal velocity of inert particles is given. It is shown that for the enforcement of constant speed of the particles in the upper section of the unit height of the upper nozzle should decrease with an increase in the diameter of the unit. Moreover, for the heavier particles should be selected unit with a smaller radius at constant all other design parameters. The correlation between the calculated and experimental data is given.

Keywords: machine, anti-swirl jets, scaling, internal nodes.

На рис 1 представлен сушильный агрегат [1] с закрученными струями инертных носителей, предназначенный для сушки термолабильных материалов, например, агар-агара. Агар-агар – это полисахаридный продукт, получаемый из красных морских водорослей. Агар неоднороден по своему

составу он содержит минеральные вещества, воду и линейный полисахарид агарозу, которой сопутствует агаропектин. Водные растворы, содержащие 0,5...1,5 % агара при охлаждении до 32...39⁰С образует прочные гели. Специфические свойства продукта требуют использования и специального оборудования. Предложенный агрегат представляет собой многоцелевое малогабаритное сушильное оборудование, отличающееся высоким удельным влагосъёмом с единицы сушильного объёма. Отличительной особенностью агрегата является способность к сушке продуктов, обладающих высокими пенообразующими и адгезионными свойствами.

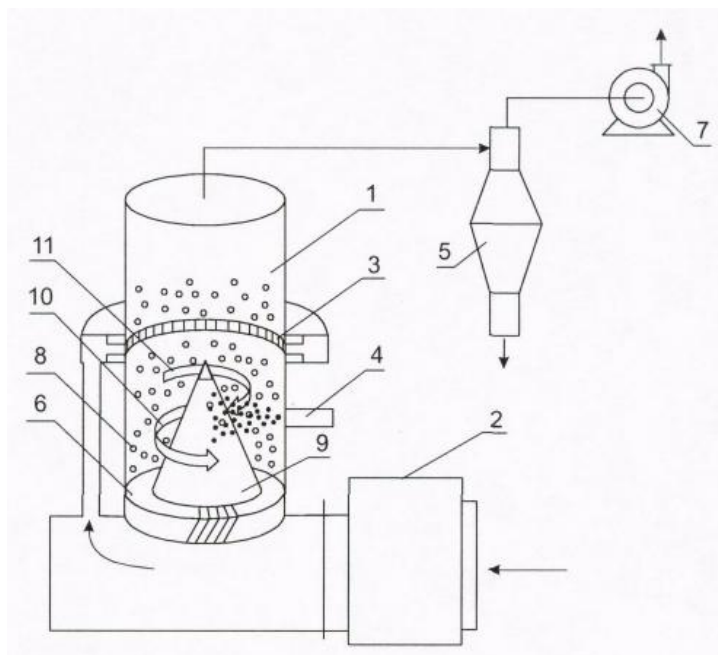


Рис. 1. Схема сушилки со встречно-закрученными потоками инертного носителя (СВЗП): 1 – сушильная камера; 2 – калорифер; 3 – верхняя газораспределительная решетка; 4 – форсунка; 5 – циклон; 6 – нижняя газораспределительная решетка; 7 – вентилятор; 8 – инертные частицы; 9 – коническая вставка; 10 – нижний вихревой слой; 11 – верхний вихревой слой

Установка СВЗП включает следующие основные части: сушильная камера – 1, система подачи исходного продукта – 4, теплогенератора – 2, блок вентиляторов – 7, система разгрузки высушенного продукта – 5, пульт управления, система воздухопроводов, система трубопроводов.

Процесс обезвоживания происходит в двух встречно-закрученных потоках инертного носителя 10, 11, где осуществляется одновременно сушка, измельчение, отделение сухого порошкообразного продукта и при необходимости его стерилизация. Чрезвычайно быстрые процессы удаления влаги из продукта и его отделения от частиц инертного носителя определяются тем, что толщина плёнки, образовавшегося на инертном носителе мала (доли миллиметра). В этом случае процесс осуществляется в периоде постоянной скорости сушки, что позволяет использовать теплоноситель (горячий воздух) с достаточно высокой для пищевых продуктов температурой (до 220 °С). Это существенно повышает удельную производительность установки и дает возможность осуществлять управляемую стерилизацию высушиваемого продукта без потери его пищевой ценности. Организация процесса сушки паст, например, агар-агара связана с решением вопроса связанного с отысканием геометрических и гидродинамических соотношений между параметрами процесса.

При рассмотрении [2] вопроса о расчете скоростей частиц инертного носителя, попадающих в нижней части аппарата в закрученный газовый поток, имеющий тангенциальную компоненту скорости,

получены выражения для расчета зависимости вертикальной и тангенциальной составляющих скорости частицы от высоты подъема при ее движении в закрученном потоке газа в цилиндрическом аппарате.

Как показали экспериментальные исследования, при масштабировании процесса сушки важную роль также играют соотношения между высотой установки верхних сопел в направлении оси z , диаметром аппарата и углом ориентации нижних сопел к горизонту γ (Рис. 2).

Исходя из условия максимума энергии соударений частиц, закрученных в противоположных направлениях нижним и верхним потоками газа, можно полагать, что верхние сопла, формирующие слой частиц с закруткой, противоположной закрутке основного потока, должны быть расположены на высоте, соответствующей максимуму вертикальной составляющей скорости частиц, разгоняющихся в струях газа, формируемых нижними соплами.

Другое условие масштабирования — постоянство зазора между стенкой аппарата и конической вставкой ($d=const$) при сохранении диаметра инертных частиц — получается из-за постоянства взаимодействия струй газа с инертными частицами. Это условие определяет линейную зависимость входного сечения от радиуса аппарата

$$S_{ex} = \pi(R^2 - R_{вст}^2) = \pi d(D - d)$$

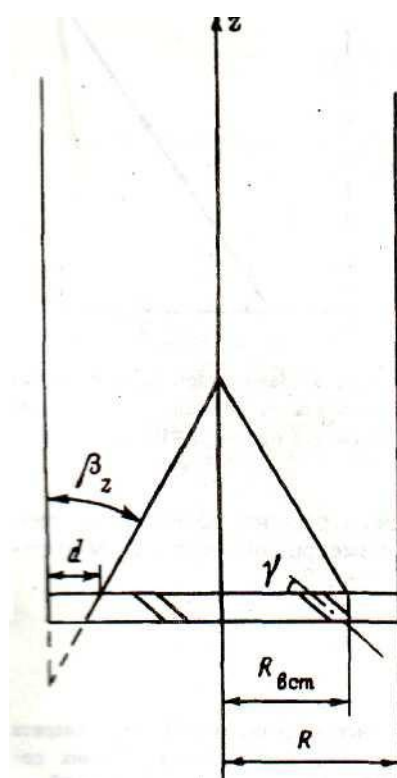


Рис. 2. Геометрические характеристики аппарата, z – вертикальная координата, R – радиус аппарата, $R_{вст}$ – радиус конической вставки, γ – угол ориентации нижних сопел к горизонту, d – зазор между стенкой аппарата и конической вставкой, β_z – угол раскрытия струи

Другое условие масштабирования — постоянство зазора между стенкой аппарата и конической вставкой ($d=const$) при сохранении диаметра инертных частиц — получается из-за постоянства

взаимодействия струй газа с инертными частицами. Это условие определяет линейную зависимость входного сечения от радиуса аппарата

$$S_{ex} = \pi(R^2 - R_{всм}^2) = \pi d(D - d)$$

т.е. $S_{ex} \approx D$, где R – радиус аппарата, $R_{всм}$ – радиус конической вставки, D – диаметр аппарата.

Площадь же верхнего сечения аппарата, очевидно, пропорциональна R^2 . Также при масштабировании выполняется условие постоянства отношения объемных расходов газа через нижнее и верхнее сечения аппарата [2].

$$L_1 / L_2 = const, \tag{2}$$

где $L_1 = v_{ex} S_{ex}$, $L_2 = v_{вых} S_{вых}$, v_{ex} и $v_{вых}$ – скорость газа в верхнем и нижнем сечениях аппарата, S_{ex} и $S_{вых}$ – площади этих сечений.

При соблюдении принятых условий получаем $v_{ex} \approx R$, что физически объясняется необходимостью увеличить раздутие нижнего слоя инертных частиц при увеличении радиуса аппарата.

Попробуем теперь выяснить связь между радиусом аппарата и углом ориентации нижних сопел. В работе [3,4,5,6,7,8] получено следующее выражение для вертикальной составляющей скорости частицы в закрученном потоке:

$$v_z = \sqrt{2g \left[B_z (z - z_0) / (zz_0) + z_0 - z \right]} \tag{3}$$

Здесь

$$B_z = (b_z \sqrt{b_\tau^2 + b_z^2}) / w_{вит}^2 \tag{4}$$

$$b_z = L / (R \operatorname{tg} \beta_z), b_\tau = L / (R \operatorname{tg} \beta_\tau), \tag{5}$$

где L – расход газа ($\text{м}^3/\text{с}$); R – радиус аппарата (м); β_z, β_τ – углы раскрытия струй (град); $w_{вит}$ – скорость витания; g – ускорение свободного падения ($\text{м}^2/\text{с}$); координата z_0 определяется из соотношения $z_0 = d / \operatorname{tg} \beta_z$.

Ввиду постоянства зазора между стенкой аппарата и конической вставкой, а также в силу линейности расширения струи угол тангенциального раскрытия струи β_τ можно считать постоянным.

Высота z , дающая экстремум выражению (3), определяет соотношением

$$z = \left[L / (R w_{вит} \operatorname{tg} \beta_\tau) \sqrt{\operatorname{tg} \gamma (\operatorname{tg}^2 \gamma + 1)} \right] \tag{6}$$

При этом мы воспользовались формулой, связывающей углы β_z и β_τ

$$\operatorname{tg} \beta_\tau = \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \beta_z, \tag{7}$$

Формула (6) полностью описывает связь трех параметров: z , R и γ . Очевидно, что при постоянстве z радиус R пропорционален величине угла γ , т. е. при масштабировании увеличение радиуса должно сопровождаться увеличением угла γ , что и подтверждается экспериментально. Расчеты, проведенные по формуле (6), дали следующие результаты. При увеличении угла γ диаметр аппарата увеличивается почти линейно, причем при γ более 30° скорость роста диаметра несколько увеличивается. Эта зависимость изображается графиком на рис. 3. Рис. 4 иллюстрирует зависимость диаметра от расхода теплоносителя L при постоянном угле γ ($\gamma = 30^\circ$). При возрастании L внутренний диаметр быстро увеличивается. Нами были исследованы два аппарата различного диаметра с одинаковой высотой расположения верхних сопел. Угол ориентации нижних сопел γ подбирался таким образом, чтобы соблюдалось условие постоянства скорости частиц в верхнем сечении аппарата. Точки, иллюстрирующие этот эксперимент, обведены на теоретическом графике (рис.3) кружочками. При диаметре аппарата 36 см оптимальный угол $\gamma = 13^\circ$, а при диаметре 56 см – 25° .

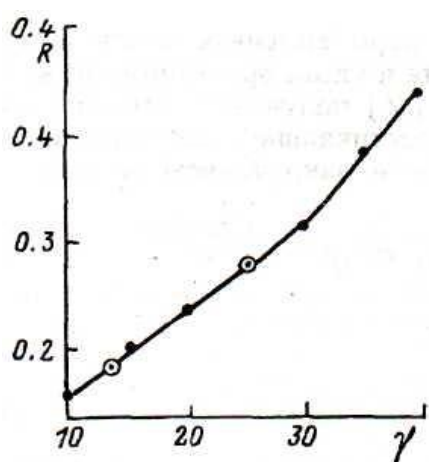


Рис. 3. Зависимость радиуса R (м)

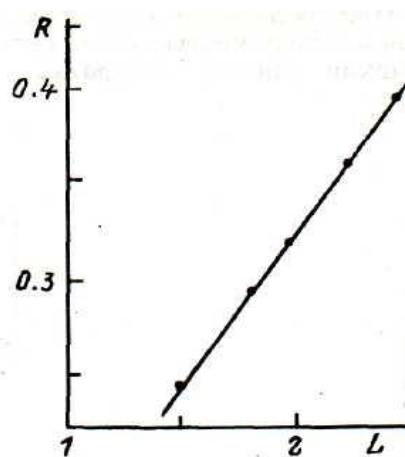


Рис. 4. Зависимость радиуса R (м)

аппарата от угла ориентации γ нижних сопел при $L = 2 \text{ м}^3/\text{с}$, $w_{\text{вум}} = 18 \text{ м/с}$, $z = 0,3 \text{ м}$.

аппарата от расхода теплоносителя при L (m^3/s) при $w_{\text{вум}} = 18 \text{ м/с}$, $\gamma = 30^\circ$, $z = 0,3 \text{ м}$.

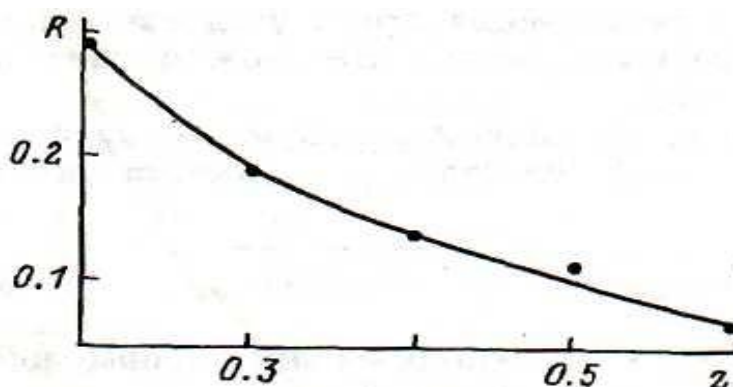


Рис. 5. Зависимость радиуса R (м) аппарата от высоты z (м) расположения верхних сопел при $L = 2 \text{ м}^3/\text{с}$, $w_{\text{вум}} = 18 \text{ м/с}$, $\gamma = 15^\circ$

На рис. 5 и 6 приведены графики зависимостей радиуса аппарата от высоты расположения верхних сопел и скорости витания инертных частиц соответственно.

Первый график иллюстрирует тот факт, что для соблюдения постоянства скорости частиц в верхнем сечении высота расположения верхних сопел должна уменьшаться при увеличении диаметра аппарата, при постоянном угле ориентации нижних сопел и постоянной скорости газа на входе. Это условие также было подтверждено экспериментально путем замеров скоростей верхнего потока газа в тех же аппаратах, но на разных высотах при постоянном угле γ ($\gamma = 15^\circ$).

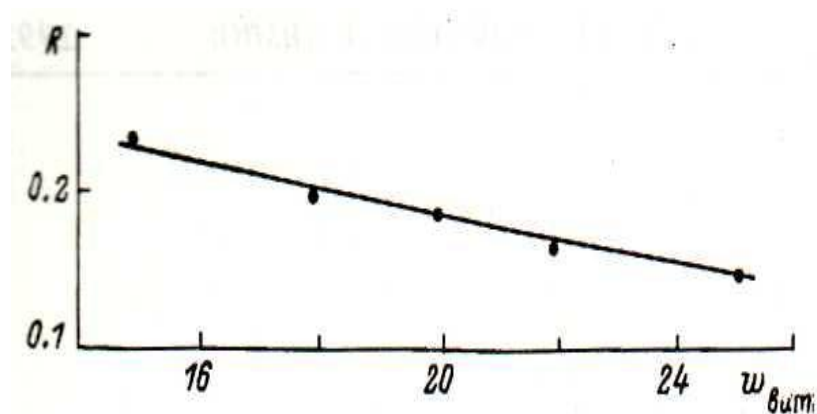


Рис. 6. Зависимость радиуса R (м) аппарата от скорости витания инертных частиц $w_{вит}$ (м/с) при $L = 2 \text{ м}^3/\text{с}$, $\gamma = 15^\circ$, $z = 0,3 \text{ м}$

Второй график иллюстрирует выбор радиуса аппарата в зависимости от скорости витания инертных частиц. Для более тяжелых частиц необходимо брать аппарат с меньшим радиусом при постоянстве всех остальных конструктивных параметров.

Таким образом, данные эксперимента хорошо согласуются с расчетом по формуле (6), что подтверждает правомерность условий масштабирования, описанных в статье.

Список литературы

1. А.с. 1560948 СССР, F 26 В 3/10, 1990. Способ сушки жидких материалов.
2. Васильев В.Н., Куцакова В.Е., Фролов С.В. Технология сушки. Основы тепло и массопереноса // СПб.: Гиорд, 2013, – 224 с.
3. Куцакова В.Е., Уткин Ю.В., Марков Н.Б. // ЖПХ. 1990. Т. 63. № 11. С. 2590 – 2592.
4. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Шкотова Т.В., Чичина Т.В. // Известия ВУЗов. Пищевая технология. 2012, №4 с.93 – 95
5. Kutsakova V.E. Drying Technology, 2004, Vol.22. No.10, pp 2343–2350/
6. Kutsakova V.E. Drying Technology, 2007, Vol.25. No.3, pp 1–4
7. Фролов С.В., Куцакова В.Е., Шкотова Т.В. Теория регулярного режима в решениях задач нестационарного массопереноса в процессе сушки // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 4.
8. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Мереминский Г.И. Свидетельство на полезную модель. RU № 14648 Устройство для сушки жидких материалов.

References

1. A.s. 1560948 SSSR, F 26 V 3/10, 1990. Way of drying of liquid materials..
2. Vasil'ev V.N., Kutsakova V.E., Frolov S.V. Tekhnologiya of drying. Bases warmly and mass transfer// SPb,: Giord, 2013, – 224 p.
3. Kutsakova V.E., Utkin Yu.V., Markov N.B. // ZhPKh. 1990. T. 63. № 11. S. 2590 – 2592.
4. Kutsakova V.E., Frolov S.V., Shkotova T.V., Chichina T.V.// Izvesti VUZov. Pishchevaya tekhnologiya. 2012, №4 p.93 – 95
5. Kutsakova V.E. Drying Technology, 2004, Vol.22. No.10, p. 2343–2350/
6. Kutsakova V.E. Drying Technology, 2007, Vol.25. No.3, p. 1–4
7. Frolov S.V., Kutsakova V.E., Shkotova T.V. The theory of the regular mode in solutions of problems of a non-stationary mass transfer in the course of drying // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv.* 2013. № 4.
8. Kutsakova V.E., Frolov S.V., Mereminskii G.I. Svidetel'stvo na poleznuyu model'. RU № 14648 Ustroistvo dlya sushki zhidkikh materialov.