

УДК.665.937.6 : 66.084

В.И. Погонец, И.Х. ПешковДальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ЧАСТИЦ АГАРА
ВО ВЗВЕШЕННО-ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ**

Проведены экспериментальные исследования сушки частиц агара на установке со взвешенно-закрученными потоками. Получены результаты по скорости витания частиц с учетом их размерных фракций, степени расширения слоя, изменению давления теплоносителя с учетом высоты кипящего слоя в камере сушки. Построены графические зависимости, анализ которых позволил выявить особенности кинетики и гидродинамики процесса сушки продукта.

Ключевые слова: исследования, сушка, кипящий слой, агар, кинетика, гидродинамика.

V.I. Pogonets, I.H. Pechkov**FEATURES OF DRYING OF THE PARTICLES OF AGAR
IN SUSPENSION-SWIRLING FLOWS**

Experimental studies of drying of the particles of agar on the installation of a balanced-twisted flows. Results are obtained for the velocity of soar of the particles according to their size fractions, the degree of bed expansion, changes in coolant pressure with the height of the fluidized bed in drying chamber. Graphical dependences were constructed and its analysis revealed features of the kinetics and hydrodynamics of a process of drying product.

Key words: research, drying, boiling layer, hydrodynamics, kinetics, agar.

В статье [5] описано гидродинамическое состояние кипящего слоя частиц агара при сушке во взвешенном состоянии. Дальнейшие наши исследования этих процессов позволили выявить особенности кинетики и гидродинамики сушки продукта, построить графические зависимости, а их последующий анализ дает возможность оптимизировать параметры применительно к производственному технологическому циклу.

Зависимость скорости витания частиц агара в камере сушки, представленная на рис. 1, построена по полученным экспериментальным данным. Из графика видно, что изменение величины скорости витания частиц зависит от их размеров и происходит по экспоненциальному закону.

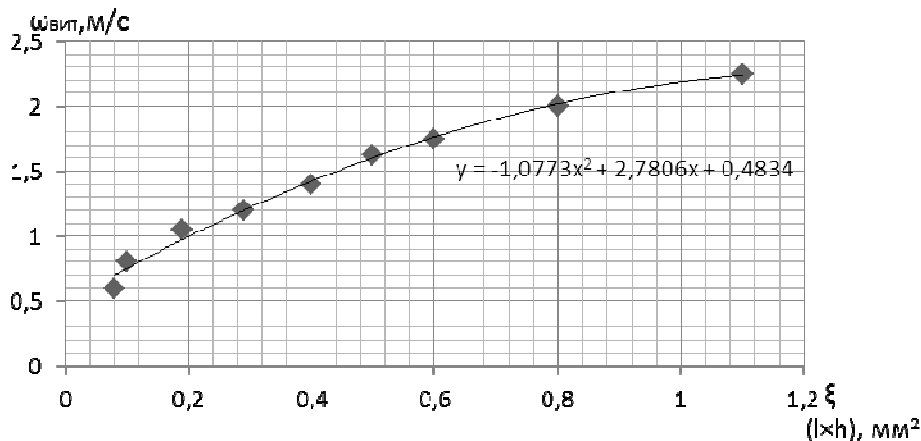


Рис. 1. Зависимость скорости витания частиц агара от их характерного размера $(l \times h)$
Fig. 1. Dependence of the velocity of soar of the particles of agar by their characteristic size $(l \times h)$

В связи с тем, что кипящий слой полидисперсных частиц агара обладает удерживающей способностью в отношении мелкой фракции и этим препятствует мгновенному уносу их из слоя при достаточно высоких скоростях теплоносителя, действительное значение второй критической скорости несколько выше. Поэтому полученные значения скорости витания могут служить верхним пределом существования кипящего закрученного слоя частиц агара.

Структура кипящего слоя агара является важной характеристикой, которая влияет на правильную организацию процессов сушки и охлаждения. Для достижения оптимальных условий проведения этих процессов необходимо обеспечить наибольшую поверхность межфазного контакта в единице рабочего объема, равномерное распределение взаимодействующих потоков по сечению камер сушки, устранение малоподвижных и застойных зон, если таковые появляются при непрерывной работе аппаратов.

Величиной, наиболее полно характеризующей структуру полидисперсного материала в кипящем слое, является его порозность. Увеличение порозности свидетельствует о расширении слоя, а величина объема в расширенном состоянии необходима для оценки интенсивности тепломассообмена и определения конструктивных размеров сушильных камер в сушильных аппаратах и установках. При неоднородном кипении величина порозности слоя в разных точках различна и не остается постоянной во времени вследствие барботажа теплоносителя или по причине образования неустойчивых каналов между кипящими твердыми частицами. Повышенное значение порозности из-за динамического возбуждения струй теплоносителя наблюдается над газораспределительной решеткой в зоне гидродинамической стабилизации. Основными параметрами, влияющими на её величину, являются конструкция используемой газораспределительной решетки, скорость теплоносителя, подаваемого в камеру сушки, и размер частиц агара. Величина зоны гидродинамической стабилизации оказывает существенное влияние на интенсивность процессов тепломассообмена. За этой зоной порозность частиц изменяется незначительно даже с повышением скорости теплоносителя.

Порозность слоя частиц агара в кипящем состоянии можно определить приближенно по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{ОЧА}}{V_{КС}}, \quad (1)$$

где $V_{ОЧА}$ – объем частиц агара; $V_{КС}$ – объем кипящего слоя.

Для аналитических расчетов порозности кипящего слоя частиц при сушке различных материалов используют известные формулы, полученные разными авторами, которые приведены во многих литературных источниках [1, 2]. Однако применение этих формул для выявления границ существования кипящего слоя агара не позволяет с достаточной точностью определить его структурные характеристики. В этой связи у нас возникла необходимость экспериментальным путем исследовать эти изменения структуры кипящего закрученного слоя агара.

По полученным экспериментальным данным построены графические зависимости степени расширения полидисперсного слоя агара от скорости теплового агента и начальной высоты слоя $H = f(H_c, \omega)$, рис. 2.

Анализ полученных графических зависимостей показывает, что кривые расширения полидисперсного слоя агара с начальной высотой 200-250 мм воспроизводятся гораздо точнее и имеют меньшие отклонения от прямой расширения однородного слоя в диапазоне рабочих скоростей, чем для слоев с начальной высотой 50, 100, 150 мм. Это свидетельствует о повышении однородности полидисперсного слоя агара с увеличением его начальной высоты до 250 мм.

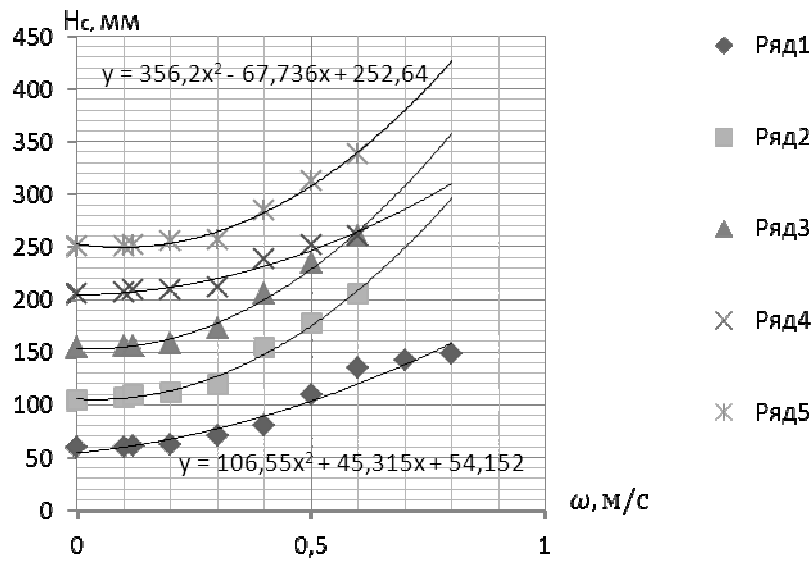


Рис. 2. Расширение полидисперсного слоя агара в зависимости от скорости подаваемого теплового агента и начальной высоты слоя в камере сушки: 1 – $H_c = 50$ мм; 2 – $H_c = 100$ мм; 3 – $H_c = 150$ мм; 4 – $H_c = 200$ мм; 5 – $H_c = 250$ мм

Fig. 2. Expansion of polydisperse layer of agar depending on the speed of the heat supplied agent and the initial height of the layer in the drying chamber: 1 – $H_c = 50$ mm; 2 – $H_c = 100$ mm; 3 – $H_c = 150$ mm; 4 – $H_c = 200$ mm; 5 – $H_c = 250$ mm

Однако чрезмерное увеличение высоты слоя при увеличивающемся значении диаметра конической камеры способствует снижению перемешивания. Об этом можно судить на основании анализа эмпирического уравнения, полученного для усредненной частицы агара,

$$(l \times h) \approx 0,3 \times 0,35 \text{ мм}; \quad \frac{H_c}{\left(\frac{D}{d}\right)} \geq 3,5; \quad W \leq 3:$$

$$S = 1 + \frac{\left(0,075 + 0,056 \frac{H_c}{\left(\frac{D}{d}\right)}\right)}{W - 1,15} (6,5 - (l \times h)), \tag{2}$$

где H_c – высота слоев в неподвижном состоянии, м; D – диаметр верхнего большего основания конической сушильной камеры, м; d – диаметр нижнего меньшего основания конической сушильной камеры, м; W – число псевдооживления; $(l \times h)$ – усредненный размер частицы агара, мм.

Из литературных источников [1,3] известно, что чем ближе значение параметра S к единице, тем перемешивание более интенсивное, а режим в аппарате приближается к режиму идеального перемешивания. Поэтому мы проводили исследования процесса псевдооживления в интервале высот неподвижного слоя частиц материала, наиболее часто встречающегося в промышленных аппаратах.

При расчете конструктивных параметров сушильных аппаратов, предназначенных для проведения процессов сушки и охлаждения материалов в кипящем слое, а также для оценки интенсивности тепло- и массообменных процессов, необходимо знать объем слоя в псевдооживленном состоянии.

На рис. 3 приведена функциональная зависимость степени расширения слоя частиц агара от числа псевдооживления $\frac{H}{H_C} = f\left(\frac{\omega}{\omega_{кр}}\right)$, полученная на основании экспериментальных исследований.

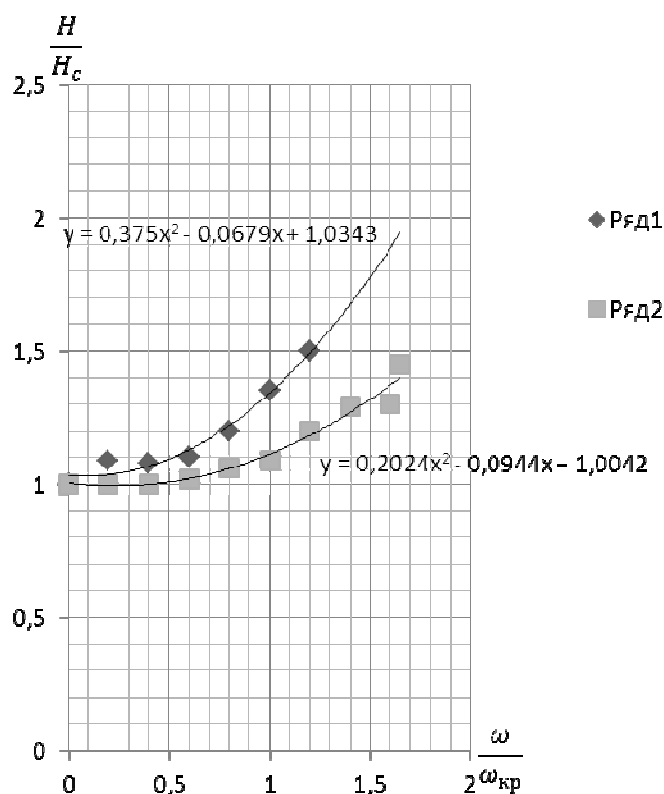


Рис. 3. Степень расширения полидисперсного слоя агара в зависимости от числа псевдооживления при различной начальной высоте слоя: 1 – $H_C = 50$ мм; 2 – $H_C = 250$ мм

Fig. 3. The degree of expansion of polydisperse layer of agar according to the number of fluidization at different initial bed height: 1 – $H_C = 50$ mm; 2 – $H_C = 250$ mm

Она показывает, что расширение слоя происходит еще до перехода его в псевдооживленное состояние. Более интенсивно подвергается расширению слой с наименьшей начальной высотой 50 мм. Так, при числе псевдооживления, равном 1, величина степени расширения равна для слоев с начальной высотой 50, 100, 150, 200, 250 мм, соответственно, 1,34; 1,18; 1,13; 1,11; 1,08. При увеличении числа псевдооживления расширение полидисперсного слоя агара в диапазоне рабочих скоростей происходит по линейному закону и определяется уравнением (3), полученным нами при математической обработке экспериментальных данных.

$$\frac{H}{H_C} = 10^{-2,75} H_C^{1,12} \cdot 12,95 \cdot H_C^{-0,56} \cdot \frac{\omega}{\omega_{кр}} \quad (3)$$

Анализ полученного уравнения показывает, что с изменением начальной высоты слоя от 50 до 250 мм уменьшение коэффициента при числе псевдооживления и увеличение значения свободного члена свидетельствуют о повышении концентрации частиц агара в единице объема слоя, а также о более равномерном ее распределении по высоте расширенного слоя. Это подтверждается построенными по экспериментальным данным графиками зависимости изменения распределения давления от концентрации материала по высоте слоя, представленными на рис. 4.

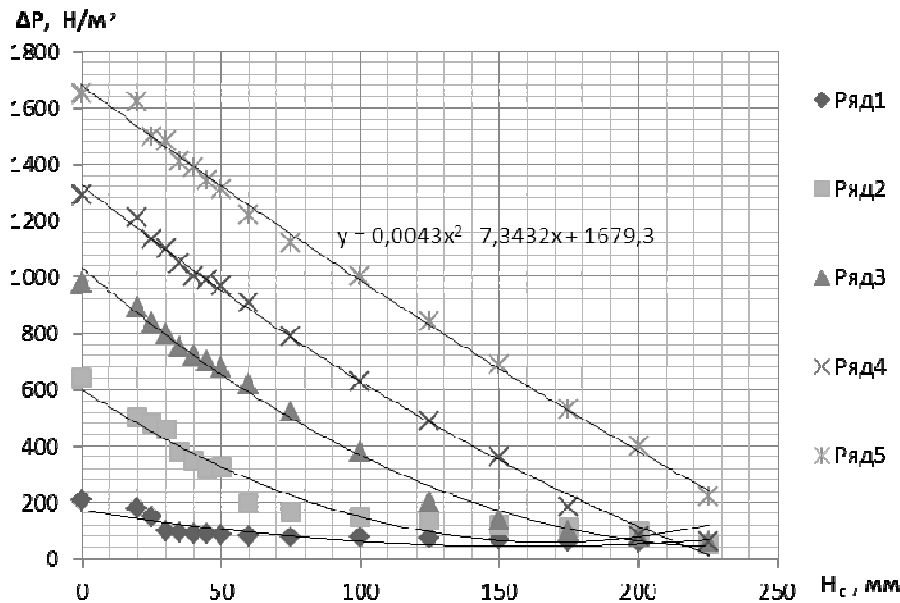


Рис. 4. Изменение давления теплового агента по высоте псевдооживленного слоя при различной начальной высоте слоя частиц агара и скорости потока воздуха:
 1 – $H_c = 50$ мм; $\omega = 0,20$ м/с; 2 – $H_c = 100$ мм; $\omega = 0,45$ м/с; 3 – $H_c = 150$ мм; $\omega = 0,8$ м/с;
 4 – $H_c = 200$ мм; $\omega = 0,5$ м/с; 5 – $H_c = 250$ мм; $\omega = 0,6$ м/с

Fig. 4. The pressure change of the thermal agent in height of fluidized bed at different initial height of the layer particles agar and air flow rate:
 1 – $H_c = 50$ mm; $\omega = 0,20$ m/s; 2 – $H_c = 100$ mm; $\omega = 0,45$ m/s; 3 – $H_c = 150$ mm; $\omega = 0,8$ m/s;
 4 – $H_c = 200$ mm; $\omega = 0,5$ m/s; 5 – $H_c = 250$ mm; $\omega = 0,6$ m/s

Для полидисперсного слоя при скоростях теплоносителя, соответствующих режиму фильтрации, распределение давления в слое подчиняется прямолинейному закону [1, 2, 4]. В псевдооживленном слое с числом псевдооживления меньше двух, т.е. в диапазоне рабочих скоростей, распределение давлений по высоте слоя от нуля до максимального значения H_c подчиняется линейному закону, а от H_c до H – экспоненциальному.

Однородность слоя оживаемого материала зависит от свойств продукта, конструктивных параметров камер сушки аппаратов, параметров оживающего агента и технологических требований процесса [1, 2]. Мерой однородности может служить изменение структуры слоя по высоте. Проведены исследования влияния величины удельной нагрузки агара на газораспределительную решетку в рабочем диапазоне скоростей, а также величины рабочей скорости на изменение структуры кипящего слоя агара. Критерием изменения

структуры служит отношение $\frac{P_{MAX}}{P_{CP}}$.

На рис. 5 показано изменение величины $\frac{P_{MAX}}{P_{CP}}$ в зависимости от расстояния от решетки до точки замера показания давления при разных удельных нагрузках материала на газораспределительную решетку. Рабочие скорости при этом представляли собой средние величины, при которых были получены соответствующие давления теплового агента по высоте слоя.

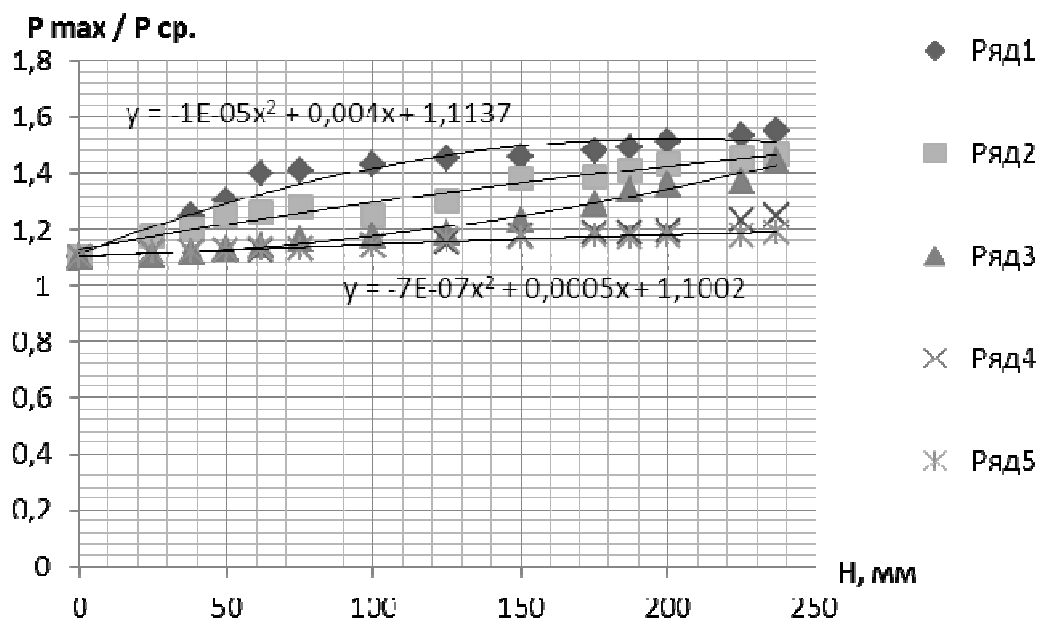


Рис. 5. Изменение величины $\frac{P_{MAX}}{P_{CP}}$ по высоте кипящего слоя агара: $1 - \frac{G}{F} = 350 \text{ Н/м}^2$;

$$\omega = 0,35 \text{ м/с}; 2 - \frac{G}{F} = 700 \text{ Н/м}^2; \omega = 0,45 \text{ м/с}; 3 - \frac{G}{F} = 1000 \text{ Н/м}^2; \omega = 0,45 \text{ м/с};$$

$$4 - \frac{G}{F} = 1375 \text{ Н/м}^2; \omega = 0,5 \text{ м/с}; 5 - \frac{G}{F} = 1725 \text{ Н/м}^2; \omega = 0,6 \text{ м/с}$$

Fig. 5. The variation in height $\frac{P_{MAX}}{P_{CP}}$ of fluidized bed of agar: $1 - \frac{G}{F} = 350 \text{ N/m}^2$; $\omega = 0,35 \text{ m/s}$;

$$2 - \frac{G}{F} = 700 \text{ N/m}^2; \omega = 0,45 \text{ m/s}; 3 - \frac{G}{F} = 1000 \text{ N/m}^2; \omega = 0,45 \text{ m/s}; 4 - \frac{G}{F} = 1375 \text{ N/m}^2;$$

$$\omega = 0,5 \text{ m/s}; 5 - \frac{G}{F} = 1725 \text{ N/m}^2; \omega = 0,6 \text{ m/s}$$

Как видно из графика, неоднородность псевдооживленного слоя по высоте при удельной нагрузке 350 Н/м^2 является наибольшей. Дальнейшее увеличение удельной нагрузки, в пределах исследуемой, повышает степень однородности по высоте слоя. С увеличением высоты от $c \cdot H_c$ неоднородность слоя увеличивается. Таким образом, увеличение удельной нагрузки агара на газораспределительную решетку способствует образованию более однородной структуры кипящего слоя.

Анализ однородности и равномерности псевдооживления полидисперсного слоя агара позволяет оценить качество псевдооживления, а также выбрать наиболее оптимальный гидродинамический режим для осуществления тепломассообменных процессов.

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.-техн. конф. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2008. – С. 616.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
5. Погонец В.И. Гидродинамические характеристики и диапазон существования кипящего закрученного слоя дисперсных частиц агара при сушке // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2011. – Вып. 25. – С. 263-266.

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

Пешков Иван Харитонович, аспирант.