

УДК.665.937.6 : 66.084

В.И. Погонец, И.Х. ПешковДальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА СУШКИ АГАРА
В КИПЯЩЕМ ЗАКРУЧЕННОМ СЛОЕ**

Проведены исследования сушки частиц агара в кипящих закрученных слоях теплоносителя. Установлены тепловые параметры процесса, при которых рекомендуется сушить агар с учетом его термостойкости.

Ключевые слова: исследования, сушка, кипящий слой, агар, гидродинамика, тепловые параметры.

V.I. Pogonets, I.H. Pechkov**THERMAL PARAMETERS OF THE DRYING PROCESS OF AGAR
IN A BOILING TWISTED LAYER**

The researches of drying process of the particles of agar in boiling swirled layers of heat carrying agent were made. Thermal parameters of the process under which it is recommended to dry the agar because of its thermal stability were installed.

Key words: research, drying, boiling layer, agar, hydrodynamics, thermal parameters.

В установках с закрученными потоками теплоносителя при сушке агара большое значение имеют вопросы распределения температуры по высоте слоя и высота активной зоны тепломассообмена. Значение действительной разности температур в слое, зависящее в основном от изменения температуры теплоносителя по высоте слоя, позволяет определить коэффициент теплоотдачи между частицами и средой.

В литературных источниках приводятся различные данные многих авторов по теплообмену между высушиваемыми частицами и теплоносителем в кипящих слоях, но все они не согласуются между собой. Основными причинами являются различия в методах исследования и обработке экспериментальных данных, а также те принимаемые исследователями допущения, которые обуславливают сложность рассматриваемых процессов сушки пищевых продуктов. Определяемые при этом коэффициенты теплоотдачи значительно отличаются между собой.

В кипящем слое коэффициент теплоотдачи определяется из соотношения между количеством переданного тепла, поверхностью теплообмена и температурным напором между частицами и теплоносителем. При этом наиболее трудоемким является определение действительной разности температур между теплоносителем и поверхностью частиц.

При высушивании в кипящем закрученном слое частицы агара совершают сложное непрерывное движение в объеме камеры как в продольном, поперечном, так и в вертикальном её направлениях. Это обеспечивает выравнивание температуры внутри слоя и уменьшение температурных градиентов по всем направлениям. При этом повышение степени перемешивания частиц и их соударения способствует интенсификации теплообмена за счет турбулизации потока теплоносителя.

С экономической точки зрения процесс сушки агара целесообразно проводить при более высокой температуре теплоносителя, однако следует помнить, что, с одной стороны, повышение температуры более 90 °С влияет на качество готового продукта. С другой стороны, повышение температуры до максимально возможного приводит к снижению удель-

ного расхода теплового агента на единицу испаренной влаги, увеличивает производительность сушилки, уменьшает её габариты и снижает энергозатраты. Вопрос о допустимой температуре нагрева необходимо рассматривать совместно с другими параметрами сушки, так как качество готового продукта зависит от скорости его нагрева и обезвоживания, времени нахождения в зоне максимальной температуры.

В статье [1] представлена созданная нами установка, на которой проведены исследования процесса сушки агара в кипящих закрученных потоках теплоносителя при непрерывном режиме работы сушилки, а также изучено влияние начальной температуры теплоносителя на конечную влажность и качественные показатели агара. Исследования проводили при следующих допущениях:

- вследствие малого термического сопротивления частиц кипящего слоя градиент температуры в частице стремится к нулю;
- теплофизические характеристики теплоносителя и продукта неизменны;
- потери тепла слоем в окружающую среду отсутствуют.

Анализ полученных данных показал, что температура для всех начальных высот слоя резко изменяется на расстоянии 40-50 мм от газораспределительной решетки и постепенно переходит к постоянной величине с возрастанием высоты слоя (рис. 1).

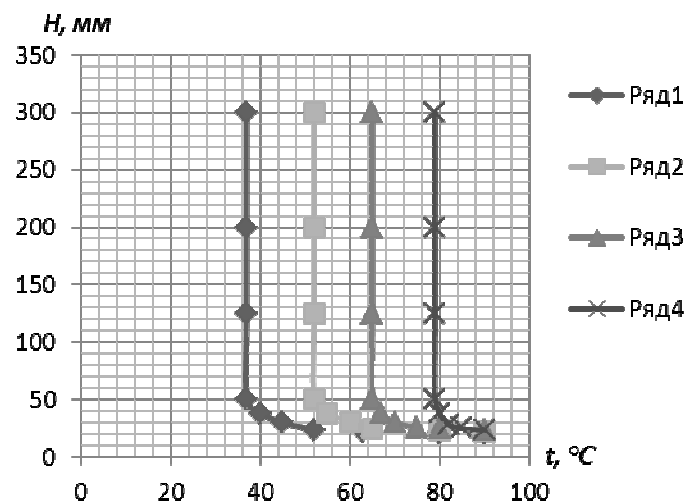


Рис. 1. Изменение температуры теплоносителя по высоте кипящего слоя агара при высоте неподвижного слоя $H_c = 250$ мм, скорости теплоносителя $\omega = 1,5$ м/с и его начальной температуре: 1 – 65 °C, 2 – 75 °C, 3 – 85 °C, 4 – 90 °C

Fig. 1. Changes of the temperature in heat carrying agent at the height of boiling layer of agar with a fixed bed height $H_c = 250$ mm, speed of heat carrying agent $\omega = 1,5$ m/s and its initial temperature: 1 – 65 °C, 2 – 75 °C, 3 – 85 °C, 4 – 90 °C

Из литературы [2, с. 18] известно, что изменение температуры с достаточной точностью описывается уравнением

$$t_h = t_c + (t_1 - t_c) \exp \left[- \frac{3\alpha \cdot M_q}{\varepsilon_q \rho_q M_c C_q} \cdot \frac{h}{H_{kc}} \right], \quad (1)$$

где t_h – температура среды на высоте h , °C; t_c – средняя температура частиц в слое, °C; t_1 – температура окружающей среды, °C; α – средний коэффициент теплоотдачи между средой и частицами, Вт/(м·град); M_q – масса частиц, кг; ε_q – характерный размер частиц

(размерная фракция), m^2 ; ρ_c – плотность материала частиц, $кг/м^3$; M_c – расход массы теплоносителя, $кг/ч$; C_c – удельная теплоемкость частиц, $Вт \cdot ч / (кг \cdot град)$; h – текущая высота кипящего слоя, $м$; H_{kc} – высота кипящего слоя, $м$.

Для начальной высоты слоя (250 мм) и соответствующей скорости оптимального режима кипения обеспечивается интенсивное перемешивание частиц агара, изменение начальной температуры теплоносителя от 65 до 90 °С сопровождается увеличением интенсивности поглощения тепла, подводимого в слой, и, следовательно, увеличением скорости сушки. Это увеличение характеризуется коэффициентами теплоотдачи, полученными на основании их локальных значений путем усреднения по поверхности теплообмена.

Средние значения коэффициентов теплоотдачи определяли по угловым показателям прямых изменения температуры теплоносителя по высоте кипящего слоя агара, построенных в полулогарифмической системе координат, полученной путем преобразования уравнения (1) и представленных зависимостей на рис. 2. Это позволило получить достаточно точные значения коэффициентов теплоотдачи, так как за основу был принят принцип изменения температуры теплоносителя по высоте слоя при идеальном перемешивании частиц агара и сквозном потоке теплоносителя. При этом значение коэффициентов теплоотдачи при оптимальном гидродинамическом режиме и температуре теплоносителя 65, 70, 75, 80, 90 °С для высоты слоя 250 мм соответственно равно 10,5, 11,3, 11,5, 11,7, 11,8 $Вт/(м^2 \cdot град)$. Это свидетельствует об их увеличении с повышением температуры теплоносителя.

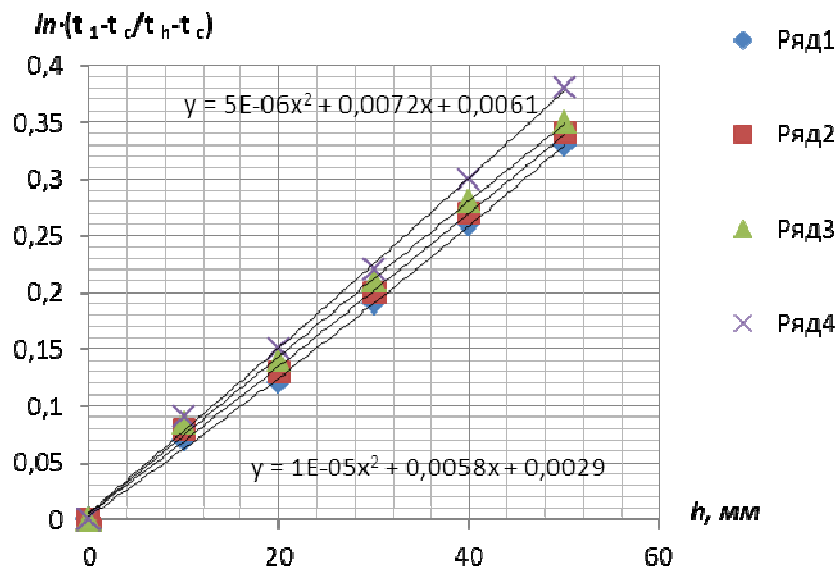


Рис. 2. Изменение температуры теплоносителя в зоне активного теплообмена при высоте неподвижного слоя агара $H_c = 250$ мм, скорости теплоносителя $\omega = 1,5$ м/с и его начальной температуре: 1 – 65 °С, 2 – 75 °С, 3 – 85 °С, 4 – 90 °С

Fig. 2. Changes of the temperature in heat carrying agent in zone of active heat transfer with a fixed bed height of agar $H_c = 250$ mm, speed of heat carrying agent $\omega = 1,5$ m/s and its initial temperature: 1 – 65 °С, 2 – 75 °С, 3 – 85 °С, 4 – 90 °С

При этом высота зоны активного теплообмена практически остается постоянной.

В результате обработки экспериментальных данных по теплообмену в кипящем закрученном слое между частицами агара и теплоносителем при длительном непрерывном режиме работы сушилки получено уравнение для определения коэффициента теплоотдачи:

$$N_u = 10,2 \left(\frac{H_0}{\varepsilon_u} \right)^{-0,54} \cdot R_e^{0,3}, \quad (2)$$

при $R_e = 5-25$; $\frac{H_0}{\varepsilon_u} = 300 - 700$, $P_r = 0,5$.

Из-за большой удельной поверхности частиц агара процесс теплообмена между ними и теплоносителем протекает очень интенсивно, что способствует быстрому выравниванию температуры теплоносителя за зоной активного теплообмена. При этом температура частиц агара практически остается постоянной по высоте слоя и для инженерных расчетов сушильных установок может быть принята равной температуре теплоносителя на выходе из слоя. Так, для неподвижного слоя высотой 150 мм при температуре теплового агента 70, 75, 80, 85 °С среднее значение температуры частиц агара соответственно равно 45, 60, 70, 81 °С; для 200 мм – 42, 55, 67, 78 °С; для 250 мм – 35, 51, 63, 75 °С. Отсюда следует, что при оптимальном гидродинамическом режиме увеличение высоты слоя приводит к понижению температуры высушенного агара.

Увеличение скорости теплоносителя по сравнению с ее значением, обеспечивающим интенсивное перемешивание частиц в слое, приводит к интенсификации тепломассообмена за счет увеличения порозности слоя, предотвращения агломерации частиц агара и образования застойных зон. Однако при больших скоростях теплоносителя наблюдается значительный унос мелких частиц агара из сушильной камеры.

При анализе полученных экспериментальных кривых зависимостей, представленных на рис. 1, видно, что при постоянстве начальной температуры теплоносителя, изменении высоты слоя и оптимальной скорости кипения высота зоны активного теплообмена остается практически неизменной. Однако при этом происходит смещение в сторону профиля температурного поля теплоносителя, что свидетельствует о более полном использовании его теплового потенциала. При этом наблюдается понижение температуры частиц при выходе из слоя.

Вместе с тем вопрос о выборе оптимальной высоты кипящего слоя до настоящего времени не получил окончательного решения. Некоторые исследователи считают [2, с. 41], что при осуществлении процессов сушки в кипящем слое в зоне активного теплообмена можно передать 200-400 млн кДж с 1 м² решетки в час. При этом нельзя оставлять без внимания то, что увеличение высоты слоя приводит к более равномерному его ожигению и улучшает условия управления процессом. Это подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными нами с агаром. Однако увеличение высоты слоя приводит также к повышению сопротивления прохождению теплоносителя, что повышает энергетические затраты, увеличивает среднюю абсолютную скорость движения частиц. Поэтому высота слоя при выборе оптимального режима сушки в кипящем закрученном слое должна определяться на основе всестороннего анализа этого процесса.

Процесс массообмена протекает совместно с теплообменом и определяется в основном развитой поверхностью контакта фаз и интенсивностью их перемешивания. Этот процесс достаточно полно изучен и изложен в литературных источниках [1, 2, 3, 5, 6], и согласно полученным утверждениям концентрация диффундирующей влаги в теплоносителе при сушке в стационарном режиме описывается также экспоненциальной зависимостью, а процесс массообмена завершается на весьма небольшом расстоянии от газораспределительной решетки. Однако ввиду непрерывности процесса сушки исследования изменения концентрации влаги по высоте слоя практически трудно осуществить. Поэтому нами исследовалось изменение конечной влажности высушиваемого агара с увеличением началь-

ной высоты слоя до 250 мм и увеличением температуры теплоносителя до 90 °С. Проведенные исследования показали, что при температуре теплоносителя до 90 °С и оптимальном гидродинамическом режиме конечная влажность частиц агара колеблется в пределах 5-7 %. Повышение температуры теплоносителя приводит к понижению конечной влажности высушиваемого продукта, ухудшению качества продукта в результате его подгорания, увеличению производительности сушильной установки и снижению удельного расхода электроэнергии.

С повышением высоты неподвижного слоя агара при условии интенсивного перемешивания конечная влажность продукта изменяется незначительно для одинаковых значений температуры теплоносителя.

На рис. 3 приведена обобщенная кривая изменения влажности высушиваемого агара от температуры теплоносителя, подводимого в слой.

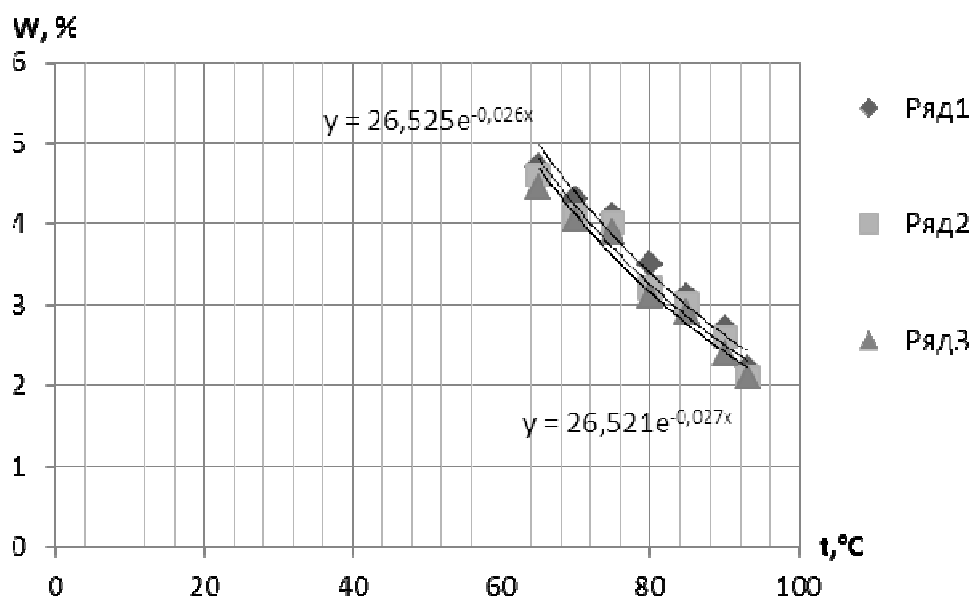


Рис. 3. Зависимость конечной влажности агара от начальной температуры теплоносителя при высоте неподвижного слоя: 1 – 150 мм, 2 – 200 мм, 3 – 250 мм

Fig. 3. The dependence of the final moisture content of agar on the initial heat carrying agent temperature at the height of fixed bed: 1 – 150 mm, 2 – 200 mm, 3 – 250 mm

При исследовании процесса сушки агара в стационарном кипящем закрученном слое основной задачей являлось определение допустимой температуры теплоносителя, позволяющей интенсифицировать процесс переноса тепла и влаги и обеспечивающей допустимый нагрев частиц агара без изменения его качественных показателей.

Исследования, проведенные с агаром, показали, что значение оптимальной температуры теплоносителя колеблется в пределах 80-85 °С. Повышение температуры теплоносителя выше 90 °С приводило к заметному ухудшению качественных показателей – покоричневению частиц, изменению химического состава.

Таким образом, исследования процесса сушки агара в стационарном режиме позволило определить степень использования температурного потенциала теплоносителя при начальной высоте слоя 150, 200, 250 мм и скорости, соответствующей стадии развитого кипения, а также максимальное значение температуры теплоносителя, обусловленное термостойкостью агара.

Список литературы

1. Погонец В.И. Установка для сушки растворов полисахаридов во взвешенно-закрученных потоках теплоносителя // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2011. – Вып. 23.
2. Сыромятников Н.И., Васанова Л.К., Шиманский Ю.М. Тепло- и массообмен в кипящем слое. – М.: Химия, 1967. – 176 с.
3. Гинзбург А.С., Резчиков В.А. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое. – М.: Пищ. пром-сть, 1970. – 196 с.
4. 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.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
6. 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 авторах: Погонец Владимир Ильич, доктор технических наук, профессор, e-mail: pogonetsvi@mail.ru;

Пешков Иван Харитонович – аспирант.