

УДК 664.762

Профессор Л. И. Лыткина, аспирант Е. А. Острикова,  
соискатель А. И. Клейменов, студент В. Н. Носкова  
(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра технологии хранения и переработки зерна,  
тел. (473) 255-65-11

## Гидродинамика процесса сушки гречихи перегретым паром

Определены основные гидродинамические закономерности процесса сушки. Установлен характер изменения величины гидравлического сопротивления слоя гречихи с течением процесса сушки. Получено критериальное уравнение, связывающее коэффициент гидравлического сопротивления и число Рейнольдса.

Principal hydrodynamic characteristics of buckwheat drying process by superheated steam are determined. Buckwheat layer hydraulic friction value behavior as drying progresses is ascertained. Criterion equation connecting hydraulic friction coefficient and Reynolds number is obtained.

*Ключевые слова:* гидродинамика, сушка перегретым паром, гречиха.

Перспективным направлением развития крупяной отрасли является разработка прогрессивных технологий получения гречневой крупы [1]. Этот продукт обладает значительной пищевой ценностью, содержит комплекс макро- и микроэлементов, богат витаминами В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>3</sub>, и Р. Выбор рациональных режимов гидротермической обработки гречихи является залогом сохранения ее ценных питательных свойств. Для обоснования технологических параметров ГТО требуется изучение гидродинамики процесса и, в частности, определение таких величин, как порозность слоя  $\varepsilon$  и гидравлическое сопротивление слоя  $\Delta P$ .

Были проведены исследования процессов сушки зерна гречихи перегретым паром атмосферного давления [2] на экспериментальной установке, состоящей из парогенератора, пароперегревателя, циркуляционного трубопровода, рабочей камеры, вентилятора и шкафа управления. Использование перегретого пара обусловлено тем, что он обладает высоким энергетическим КПД, высокой удельной теплоемкостью и коэффициентом теплоотдачи, позволяет исключить окисление продукта за счет отсутствия кислорода воздуха и улучшить качество.

Перед термической обработкой применялось пропаривание насыщенным паром, полученным из расчетного количества воды таким образом, что первоначальная

влажность зерна гречихи (11-13 %) возрастала до 18-21 %. Это способствовало изменению физических, микробиологических и биохимических свойств зерна, необходимых для реализации последующей технологии.

Скорость теплоносителя, циркулирующего по трубопроводу установки, изменялась от 0,35 до 1,30 м/с, а его температура – в пределах от 378 до 393 К (с шагом в 5 К). Температура продукта определялась с помощью хромель-копелевых термопар, его влажность – методом высушивания до постоянной массы в сушильном шкафу. Продолжительность процесса сушки составляла 4-5 мин в зависимости от режима и начальной влажности сырья; высота слоя продукта на газораспределительной решетке – 18-23 мм. Конечная влажность продукта составляла около 11-13 %.

Температурные режимы и продолжительность процесса выбирались, исходя из минимизации энергетических затрат и максимального сохранения питательных веществ в продукте.

Стационарный слой зерна гречихи представляет собой систему с весьма сложными и многообразными геометрическими характеристиками. Слой рассматривали как однородную изотропную среду, основными обобщенными характеристиками которой являются порозность  $\varepsilon$  и удельная поверхность зернистого слоя  $a$  [3, 4]. Остальные параметры слоя (распределение зерен по размерам и форме, укладка слоя и др.) в меньшей степени влияют на гидравлическое сопротивление слоя.

Порозность стационарного слоя гречихи определяли по формуле [3, 4]

$$\varepsilon = 1 - (\rho_1 \lambda_{\text{н}} / \rho_0),$$

где  $\rho_1$  – плотность зерна гречихи (определяли на измерительной установке CossfieldRT-1394H). В начале сушки  $\varepsilon = 0,539$ .

Удельную поверхность слоя  $a$  для зерна гречихи получили из уравнения [3, 4]

$$a = \sqrt{\frac{\Delta P \varepsilon^3}{H_{\text{н}} \nu \mu k_1 (1 - \varepsilon)^2}}.$$

Так как интервал дисперсности зерна ( $d_{\text{max}}/d_{\text{min}}$ ) < 2, т. е. структура их слоя не отличалась от структуры слоя монодисперсной запытки, то было принято  $k_1 = 4$  [3, 4]. Вводя соответствующий коэффициент экранировки  $k_n = 0,93$  [3], учитывающий исключение из активного тепло- и массообмена какой-то части поверхности зерна вследствие контакта с окружающим его зерном, определена эффективная удельная поверхность зерна гречихи:

$$a' = a k_n.$$

Отклонение конечной удельной поверхности  $a'_k$  от начальной удельной поверхности  $a_0$  зерна гречихи было значительным, что указывает на большую усадку продукта при сушке перегретым паром.

Анализ изменения гидравлического сопротивления слоя гречихи в процессе сушки при температурах перегретого пара в интервале 378...393 К и скоростях в интервале 0,35...1,30 м/с указывает на экспоненциальное уменьшение  $\Delta P$  в начале процесса сушки, которое обусловлено снижением влажности продукта (рис. 1). Экспериментальные данные подтвердили, что зависимость сохраняется на всем протяжении заданных интервалов температур и скоростей. В дальнейшем гидравлическое сопротивление слоя высушиваемого зерна гречихи менялось несущественно, что объясняется незначительным изменением влажности гречихи. Изменение  $\Delta P$  связано с изменением порозности слоя, влагосодержания и усадки частиц продукта.

Установлено также, что коэффициент гидравлического сопротивления слоя частиц продукта  $\lambda$  зависит в основном от скорости перегретого пара (рис. 2).

Определяя коэффициент гидравлического сопротивления по формуле [3, 5]

$$\lambda = \frac{2 \Delta P \varepsilon^3}{H_{\text{сб}} a \rho v^2},$$

установили, что для инженерных расчетов удобна наиболее простая функция  $\lambda = f(\text{Re})$ .

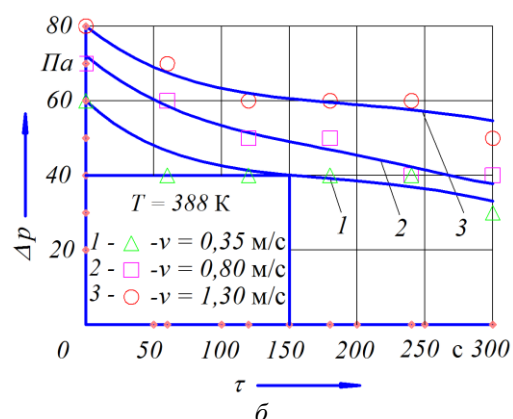
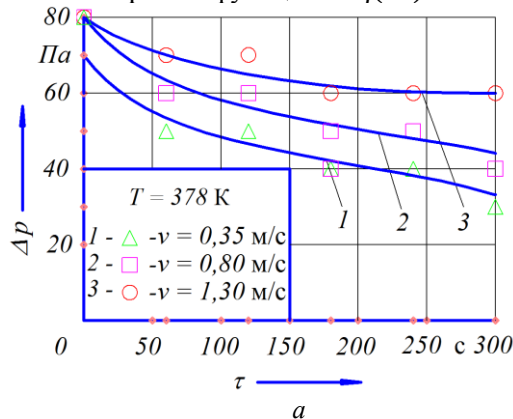


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления  $\Delta P$  от продолжительности  $\tau$ , с, процесса сушки гречихи перегретым паром при различных температурах перегретого пара,  $T$ , К: а – 378; б – 388

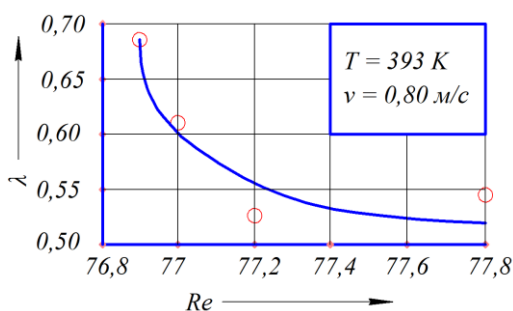


Рис. 2. Зависимость коэффициент гидравлического сопротивления слоя частиц продукта  $\lambda$  от критерия Рейнольдса ( $\text{Re}$ )

Обработка экспериментальных данных позволила определить эту зависимость в виде

$$\lambda = A / \text{Re}^n.$$

В области движения перегретого пара с преобладанием сил инерции ( $\text{Re} < 2000$ ) коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  зависит от скорости пара, удельной поверхно-

сти слоя продукта, которая является функцией влагосодержания.

При движении перегретого пара сквозь слой высушиваемой гречихи его температура и насыщение влагой снижаются. Это меняет вязкость пара.

Значения критерия  $Re$ , вычисленные с учетом варьирования всех входящих в него величин в процессе сушки зерна гречихи перегретым паром, изменялись в диапазоне от 76,9 до 77,8.

В результате обработки экспериментальных данных была определена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления как функция  $\lambda = f(Re)$ :

$$\lambda = 0,6828 / Re^{0,187}.$$

Величина достоверности аппроксимации составила  $R^2 = 0,8962$ .

В результате проведенных исследований выявлено изменение высоты слоя зерна гречихи в течение процесса сушки за счет его усадки: от 18...24 мм в начале процесса до 14...19 мм в конце сушки (рис. 3).

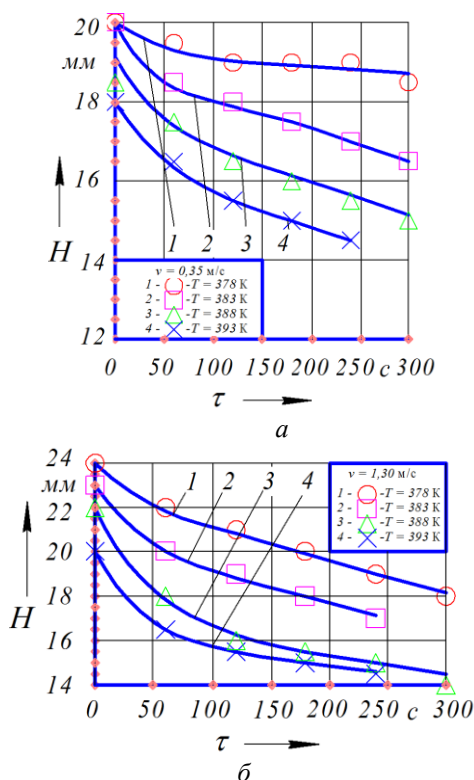


Рис. 3. Зависимость высоты слоя зерна гречихи  $H$ , мм, от времени  $\tau$ , с, в процессе сушки гречихи перегретым паром при различных скоростях перегретого пара,  $v$ , м/с: а – 0,35; б – 1,30

Одним из факторов, ухудшающих качество зерна гречихи при сушке перегретым паром атмосферного давления, является растрес-

кивание. Оно происходит вследствие развития объемно-напряженного состояния свыше предельно допустимого. Это напряженное состояние обусловлено недопустимой усадкой, которая возникает в результате неравномерного распределения полей влагосодержания и температуры внутри продукта [6]. После сушки зерно должно сохранить свой объем и структуру. В связи с этим необходимо количественно оценить величину усадки.

Если относительную усадку обозначить через  $\delta$ :

$$\delta = (V_i - V_k) / V_i,$$

где  $V_n$ ,  $V_k$  – начальный и конечный объем слоя зерна гречихи,  $m^3$ ; то коэффициент объемной усадки [6]

$$\beta_v = \frac{\delta}{(u_i - u_k) - \delta u_i},$$

где  $u_n$ ,  $u_k$  – начальное и конечное влагосодержание гречихи, кг/кг.

В процессе сушки коэффициент объемной усадки зерна гречихи увеличивался (рис. 4).

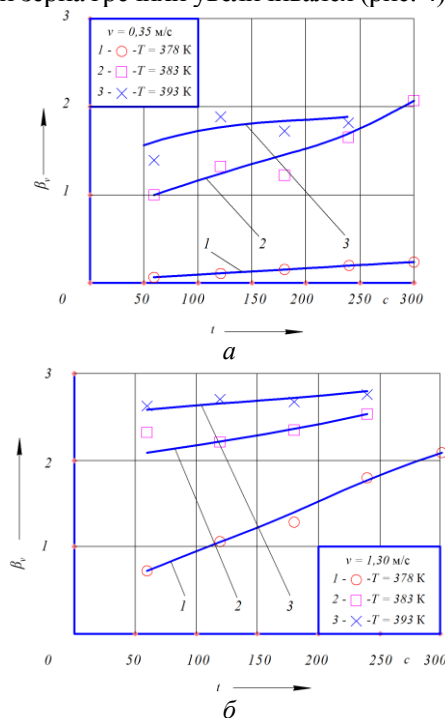


Рис. 4. Зависимость коэффициента объемной усадки  $\beta_v$  от времени  $\tau$ , с, в процессе сушки гречихи перегретым паром при различных скоростях перегретого пара,  $v$ , м/с: а – 0,35; б – 1,30

В результате математической обработки экспериментальных данных было получено эмпирическое уравнение, выражающее зависимость величины усадки  $\delta$  от текущего влагосодержания гречихи:

$$\delta = 0,2077 \ln u - 0,0246,$$

где  $u$  – текущее влагосодержание гречихи, кг/кг.

Величина достоверности аппроксимации составила  $R^2 = 0,9747$ .

Коэффициент объемной усадки зависит от структуры зерна гречихи и видов связи влаги в нем.

Таким образом, установлен характер изменения высоты слоя зерна гречихи в процессе сушки с учетом его усадки. Получено обобщенное эмпирическое уравнение, выражающее зависимость величины усадки от текущего влагосодержания гречихи.

Результаты анализа полученных данных являются предпосылкой создания рациональных гидродинамических режимов в процессе влаготепловой обработки зерна гречихи по методу пропаривание-сушка-охлаждение, применение которых позволит минимизировать энергозатраты и получить продукт высокого качества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров, Г. А. Технология муки. Технология крупы [Текст] / Г. А. Егоров. – М.: Колос, 2005. – 296 с.
2. Лыткина, Л. И. Влаготепловая обработка зерна гречихи при комбинированном теплоподводе [Текст] / Л. И. Лыткина, А. И. Клейменов // Материалы международной научно-технической интернет-конференции «Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах». – Воронеж: ВГТА, 2011. – С. 225-230.
3. Идельчик, И. Е. Аэродинамика технологических аппаратов: (подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов) [Текст] / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
4. Остриков, А. Н. Процессы и аппараты пищевых производств: учеб. для вузов: в 2 кн. [Текст] / А. Н. Остриков, Ю. В. Красовицкий, А. А. Шевцов [и др.]; под ред. А. Н. Острикова. – СПб.: Гиорд, 2007. – 1305 с.
5. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем [Текст] / М. Э. Аэров, О. М. Годес. – Л.: Химия, 1968. – 512 с.
6. Гинзбург, А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности [Текст] / А. С. Гинзбург. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.