

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ

Наведено результати досліджень та розрахунків узагальненої кривої сушіння бурякового жому. Виконано короткий аналіз результатів наукових експериментів по дослідженню низькотемпературного сушіння продукту. Запропоновано оптимальний режим теплової обробки для наступного проектування сушарки.

Приведены результаты исследований и расчет обобщенной кривой сушки свекловичного жома. Выполнен краткий анализ результатов научных экспериментов по изучению низкотемпературных режимов сушки продукта. Предложен оптимальный режим тепловой обработки для дальнейшего проектирования сушиллки.

Results of researches and account of the generalized curve drying of sugar beet-pulp are given. The brief analysis of results of research experiments on study low temperature drying is executed. The optimum mode of thermal processing for the further designing of a dryer is offered.

A – вспомогательный коэффициент;
 N – скорость сушки первого периода;
 t – температура;
 v – скорость движения сушильного агента;
 W – влагосодержание;

τ – время;
Индексы:
 0 – начальная величина;
 к – конечная величина.

Одним из надежных методов консервации жома с целью сохранения его питательных веществ является сушка. Высушенный до влагосодержания $W_k=13-14\%$ продукт может храниться на протяжении нескольких лет без потери своих свойств, что делает производителей новых медико-профилактических препаратов независимыми от сезонности сахарного производства. Для производства пектина сушеный свекловичный жом должен быть осветленным, без примесей, не иметь постороннего запаха (дима или пепла). В связи с этим необходима разработка новых режимов сушки свекловичного жома, которые обеспечат максимальное качество конечного продукта.

Нами проведен ряд научных исследований по изучению кинетики и динамики низкотемпературных режимов сушки жома в интервале температур от 60 °С до 110 °С, когда сушильным агентом выступает нагретый воздух. Схема установки представлена на рис. 1.

Основными элементами экспериментальной установки (рис.1) являются вентилятор, который находится в середине калориферного шкафа 1, калориферы 2, 6, сушильная камера 5, весы 4, микрометр типа ММН-240 8, воздухопроводы 12. Состояние влажного воздуха в лаборатории определяли по показаниям сухого и мокрого термометров психрометра 10. Для определения барометрического давления использовали барометр 9. Мощность электронного нагревателя калорифера 6 регулируется автотрансформатором и измеряется ваттметром 9. Температура воздуха на входе в сушильную камеру 5, температура жома и температура воздуха на выходе из установки определяются при помощи хромель-копелевых термопар по показаниям цифрового прибора 11. Состояние влажности образцов контролировалось при помощи весов 4 и путем полного высушивания в

сушильном шкафу при температуре $t=105$ °С.

Влажный воздух вентилятором 1 из помещения лаборатории подается в калорифер 2, где подогревается до необходимой температуры и передается в калорифер 5, в котором догревается до температуры 60-110 °С. Количество воздуха, подаваемого в калорифер 5, измеряется при помощи микроманометра 8, а регулирование его скорости выполняется при помощи задвижки 7 по показаниям шкалы манометра 8. Нагретый воздух по воздухопроводу 12 поступает в сушильную камеру 5, проходит сквозь слой влажного материала, который находится в кассете, высушивает его и выводится в помещение. Размер поперечного сечения кассеты с образцами жома 100х100 мм. Время проведения опытов устанавливали при помощи электронного секундомера.

Опытным материалом были образцы жома с начальным содержанием сухих веществ от 8 % до 11 %. В работе проведено исследование влияния температуры и скорости движения теплоносителя на интенсивность процесса конвективной сушки жома с различным начальным влагосодержанием W .

Методика проведения опытов была следующей. После того, как на лабораторном стенде устанавливался необходимый стационарный режим, в сушильной камере размещали образец, который перед этим взвешивали. Для определения температуры материала в процессе сушки в среднем слое стружки жома устанавливали термодатчик.

Во время опыта измерялись величины, характеризующие процесс сушки: температура теплоносителя, его скорость, влагосодержание воздуха, температура и изменение массы материала за конкретный промежуток времени. Контрольное влагосодержание материала до и после опыта определяли путем высушивания его до абсолютно сухого состояния в сушильном шкафу.

По данным, полученным в ходе экспериментов, построены кривые сушки жома $W=f(\tau)$ и скорости сушки $dW/d\tau = f(W)$ (рис. 2, 3, 4).

Исследование процесса сушки жома при разных постоянных режимах показали, что при увеличении температуры теплоносителя (рис. 2) от 60 до 100 °С продолжительность сушки до конечного стандартного влагосодержания $W_k=13\%$ сокращается от 90 до 40 минут. При этом скорость процесса в период постоянной скорости сушки увеличивается от 40 до 50 %/с. Интенсификация процесса массопереноса, на наш взгляд, происходит за счет увеличения избыточного давления в капиллярах жома при увеличении температуры сушильного агента. Быстрое уменьшение интенсивности процесса удаления влаги во втором периоде можно объяснить необходимо-

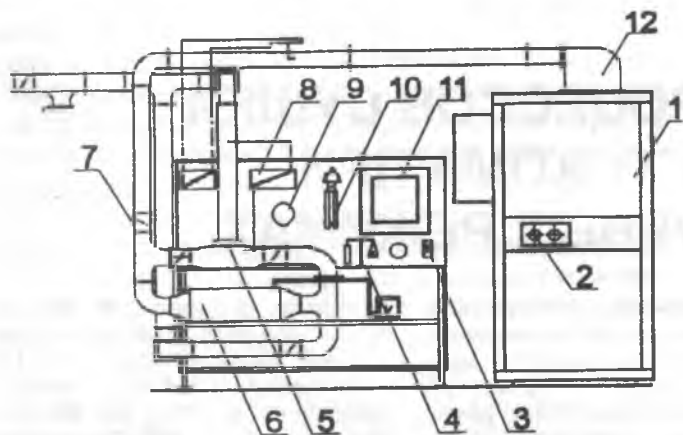


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

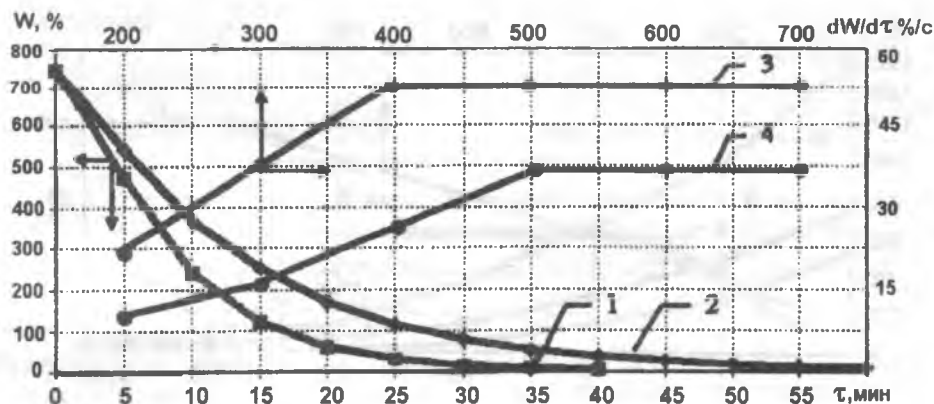


Рис. 2. Кривые сушки 1, 2 и скорости сушки 3, 4 жома при $W_0=750\%$ и скорости движения сушильного агента $v=3$ м/с при изменении температуры t : 1, 3 – 100; 2, 4 – 60 °С.

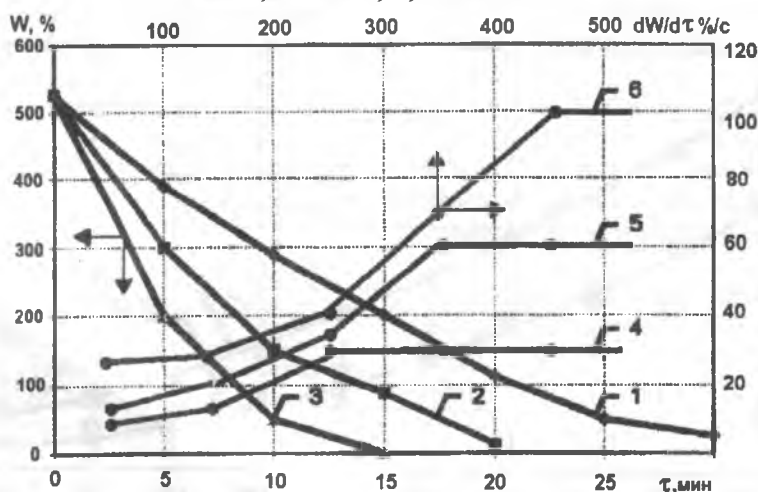


Рис. 3. Кривые сушки 1, 2, 3 и скорости сушки 4, 5, 6 жома при $W_0=525\%$ и температуре сушильного агента $t=100$ °С при изменении скорости движения сушильного агента v : 1, 4 – 1; 2, 5 – 2; 3, 6 – 4,5 м/с.

стью разрушения сильной физико-химической связи влаги, величина энергии которой для жома составляет $(0,5...3,1) \cdot 10^5$ Дж на кг удаленной влаги, а также образованием сухой корки на верхних слоях жома, которая с одновременными процессами усадки задерживает процесс выпаривания. При низких температурах второй период наступает при более высоком влагосодержании. Объясняется это тем, что на поверхности жома за счет усадки происходит перекрытие каналов выхода влаги, а внутреннее давление недостаточное для разрыва структуры жома. Так, при температуре воздуха 60 °С период постоянной скорости сушки заканчивается при $W \approx 500\%$ (кривая 3 рис. 2), а при температуре 100 °С – при $W \approx 400\%$ влагосодержания (кривая 4 рис. 2).

Как видно из приведенных на рис. 3 данных при увеличении скорости движения теплоносителя сквозь слои опытного материала от 1 до 4,5 м/с при постоянной температуре $t=100$ °С и начальном влагосодержании жома $W_0=525\%$, длительность термической обработки сокращается от 35 до 13 минут (кривые 1 и 3), а скорость процесса сушки увеличи-

вается от 30 до 100 %/с (кривые 4 и 6), но в то же время длительность второго периода сушки увеличивается от 450 % (кривая 6) до 250 % (кривая 4). Это говорит о том, что при скорости движения теплоносителя $v=1$ м/с, 50 % влаги удаляется в период постоянной скорости сушки, а при $v=4,5$ м/с – лишь 10 %. В данном случае образование внешней корки при больших скоростях сушильного агента влияет на сокращение периода постоянной скорости сушки, но не мешает сокращению длительности процесса сушки и его общей скорости. Выбор максимального значения скорости сушильного агента $v=4,5$ м/с объясняется тем, что при дальнейшем увеличении скорости движения теплоносителя стружки жома стандартного промышленного размера при достижении влагосодержания $W=50\%$ переходят в режим ожигания, что вызывает их вынос за пределы сушильной камеры и загрязнение оборудования.

На рис. 4 приведены результаты кинетики сушки жома с разным начальным влагосодержанием W_0 . Нужно отметить, что механическое обезвоживание требует энергии в 50 раз меньше, чем при тепловой

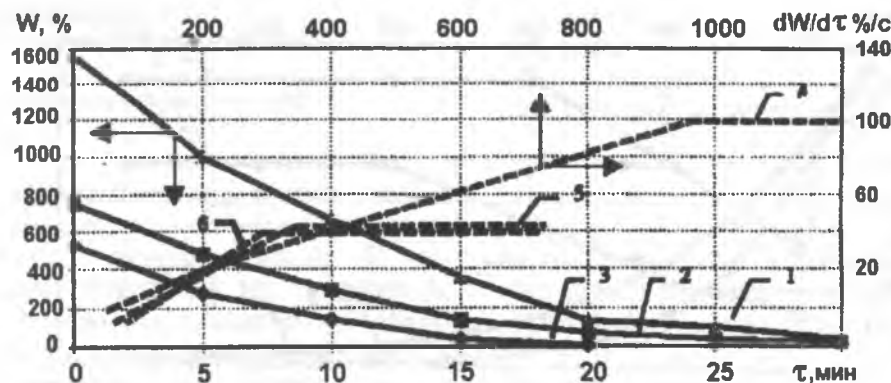


Рис. 4. Кривые сушки 1, 2, 3 и скорости сушки 4, 5, 6 жома при $W_0=525$ % и скорости движения сушильного агента $v=3$ м/с при изменении начального влагосодержания W_0 : 1 – 1565; 2 – 750; 3 – 525 %.

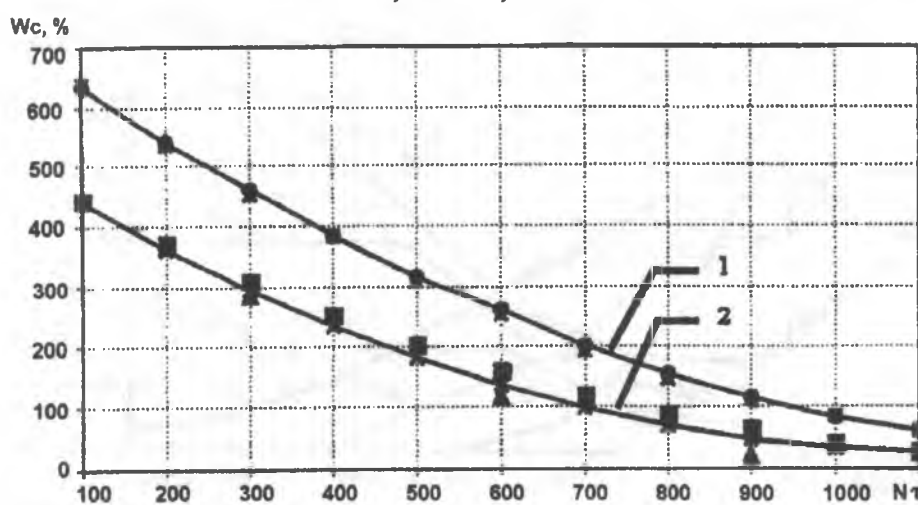


Рис. 5. Зависимость влагосодержания жома W от комплексной величины $N\tau$.

сушке [1]. Так, увеличение начального содержания сухих веществ от 8 до 30 % при влажности конечного продукта 10 %, приводит к уменьшению количества влаги, которую необходимо удалить, с 10,5 кг до 2 кг на каждый килограмм сухого продукта. А это означает существенную экономию энергоресурсов. Влияние конечной влажности в данном случае значительно слабее. Так, при одинаковой величине начального содержания сухих веществ 15 %, увеличение конечного содержания сухих веществ с 90 % до 95 % приведет к уменьшению количества удаленной воды с 5,3 кг до 5,0 кг на каждый килограмм сухого продукта. Как видно из приведенных данных, при увеличении начального влагосодержания значительно увеличивается длительность процесса обработки. Так, при увеличении W_0 от 525 до 1565 % длительность сушки увеличивается от 13 до 90 минут (кривые 1, 3 рис. 4), а скорость первого периода сушки уменьшается от 100 до 30 %/с (кривые 4, 6 рис. 4). Начальное влагосодержание продукта $W_0=1565$ % получено для жома, который не проходил механическое обезвоживание под прессами. В данном случае, при значительно боль-

шей скорости первого периода сушки 100 %/с, длительность процесса обработки слишком велика – 90 минут, что непременно вызывает лишние энергозатраты на удаление влаги.

Во время экспериментов было отмечено, что при температуре теплоносителя 100 °С и выше, процесс внутреннего прогрева жома идет очень быстро, что вызывает интенсификацию процесса внутреннего парообразования. Это, в свою очередь, создаёт избыточное давление в середине слоев стружки. За счет этого избыточного давления пар разрушает поверхностную корку и открывает себе путь к окружающей среде. Это интенсифицирует процесс массоотдачи. Уменьшение температуры теплоносителя и образование корки изменяют характер протекания процесса сушки. Медленный процесс внутреннего прогрева жома не дает необходимой энергии для быстрого разрушения связи влаги с материалом и прорыва корки. При увеличении температуры теплоносителя период постоянной скорости сушки увеличивается. Это отличает жом от других влажных дисперсных материалов, для которых эта зависимость имеет обратный характер.

Нами сделана попытка математического описания вышеупомянутых процессов в виде

$$V(t) = W_0 - \tau / (A + 0,001\tau), \quad (1)$$

Результаты расчетов коэффициента A при разных параметрах теплоносителя приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения вспомогательного коэффициента A

Температура, °C	$v = 1$ м/с	$v = 3$ м/с	$v = 4,5$ м/с
70	3.290	1.678	0.963
80	2.616	1.416	0.858
90	2.261	1.154	0.771
100	1.953	0.888	0.605

Кривые, построенные по уравнению (1), дают лучшее совпадение с экспериментальными данными в режиме максимальной скорости движения теплоносителя. Среднее отклонение теоретических и опытных данных при $v = 4,5$ м/с составляет не больше 3 %, тогда как для других двух режимов при $v = 1$ и 3 м/с эта величина составляет 10–15 %.

Обобщение экспериментальных данных по кинетике сушки жома показало, что жом, с определенным одинаковым начальным влагосодержанием W_0 , при любом режиме сушки сохраняет неизменной величину $N\tau$, которая соответствует данному влагосодержанию W . На рис. 5 приведена зависимость комплексной величины $N\tau$ для разных температур. Оперирование обобщенным числом процесса сушки придает исследованиям обобщенный

характер. При изучении процессов термической обработки жома с использованием комплекса $N\tau$ анализируется не единичный случай, а множество разных режимов, объединенных параметром W_0 . Обработка кривых 1 и 2 рис. 5 показывает, что чем больше величина скорости сушки в первый период режима, тем меньше промежутки времени, необходимый для достижения конкретного влагосодержания W , но при всех возможных N для этого W величина $N\tau$ остается постоянной.

В диапазоне комплексной величины $N\tau$ от 0 до 500, экспериментальные точки практически совпадают с кривыми 1, 2 рис. 5, а потом наблюдается некоторое отклонение от обобщенной кривой в пределах допустимой точности. Наибольшее отклонение наблюдается в конце процесса сушки. Так, при $N\tau = 1100$ разброс составляет 2 % для кривой 1 и 4 % для кривой 2.

Выводы: при проектировании и разработке оборудования для работы в промышленных условиях желательно использовать в качестве сушильного агента теплый воздух при температуре 100–120 °C и скорости 4,0 м/с. Такие параметры обеспечивают достаточно интенсивный процесс сушки и надежное качество продукта.

Литература

1. Орлов В.Д., Заборсин А.Ф., Яровой С.Л. Производство сушеного жома. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 112 с.

Получено 22.02.99 г.