

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 636.085

И.Я. Федоренко, Т.Н. Землянухина, С.В. Шилов, Н.А. Орлова  
I.Ya. Fedorenko, T.N. Zemlyanukhina, S.V. Shilov, N.A. Orlova

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ПО КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА КОНЕЧНОГО ПРОДУКТА

### SUBSTANTIATION OF DRYING PARAMETERS OF PLANT RAW MATERIALS ACCORDING TO THE QUALITY CRITERIA OF THE END PRODUCT

**Ключевые слова:** искусственная сушка растительного сырья, параметры сушки, уравнение Дальберга-Кука, уравнение регрессии, минимизация потерь питательных веществ.

Температурная сушка является важной технологией сохранения растительного и кормового сырья. Выбор конкретного метода сушки должен основываться, главным образом, на требованиях к качеству конечного продукта. Следовательно, мы должны стремиться к минимизации изменений в химическом составе сырья. В свете этого цель этой работы состояла в том, чтобы обеспечить необходимые показатели высушенного сырья на основе теоретического определения рациональной настройки параметров сушки. Установлено, что безопасные режимы сушки растительных материалов определяются уравнением Дальберга-Кука, известным в теории пастеризации молока. Это уравнение включает в себя множество режимов сушки с определенным набором параметров: «время сушки – экспозиция». Окончательный выбор режима сушки диктуется минимальными потерями питательных веществ и других компонентов растительного сырья при осуществлении этого процесса.

Такой подход в статье продемонстрирован на расчете параметров сушки зеленой травы.

**Keywords:** artificial drying of plant raw materials, drying parameters, Dahlberg-Cook equation, regression equation, minimization of nutrient loss.

Temperature drying is an important technology for the preservation of plant and feed raw materials. The choice of a specific drying method should be based mainly on the quality requirements of the final product. Therefore, we should strive to minimize the changes in the chemical composition of raw materials. In light of this, the goal of this work was to provide the necessary indices of dried raw materials based on the theoretical determination of rational drying parameters. It was found that safe modes of drying plant materials were described by the Dahlberg-Cook equation known in the theory of milk pasteurization. This equation includes many drying modes with a specific set of parameters: “drying time – temperature”. The final choice of the drying regime depends on the allowable losses of nutrients and other components of plant materials during this process. This approach is demonstrated in this paper by calculating the parameters of green grass drying.

**Федоренко Иван Ярославович**, д.т.н., проф., Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 203-271. E-mail: ijfedorenko@mail.ru.

**Землянухина Татьяна Николаевна**, к.с.-х.н., с.н.с., доцент, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: t.zemlyanukhina@mail.ru.

**Шилов Сергей Викторович**, директор, ООО «Технологии без границ», г. Бийск, Алтайский край. E-mail: Shilov\_hause@mail.ru.

**Орлова Наталья Алексеевна**, к.т.н., нач. научно-технического отдела, ООО «Технологии без границ», г. Бийск, Алтайский край. E-mail: orlova.tbg@mail.ru.

**Fedorenko Ivan Yaroslavovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 203-271. E-mail: ijfedorenko@mail.ru.

**Zemlyanukhina Tatyana Nikolayevna**, Cand. Agr. Sci., Senior Staff Scientist, Assoc. Prof., Altai State Agricultural University. E-mail: t.zemlyanukhina@mail.ru.

**Shilov Sergey Viktorovich**, Director, ООО “Tekhnologii bez granits”, Biysk, Altai Region. E-mail: Shilov\_hause@mail.ru.

**Orlova Natalya Alekseyevna**, Cand. Tech. Sci., Head, Scientific and Technical Dept., ООО “Tekhnologii bez granits”, Biysk, Altai Region. E-mail: orlova.tbg@mail.ru.

### Введение

Растительное сырье содержит значительное количество воды. В овощах ее содержится от 65 до 95%, в картофеле среднем – 75%, во фруктах – 73-88%, зеленой траве и растительном лекарственном сырье – 65-85% [1-3].

Удаление влаги из сырья исключает возможность протекания микробиологических и биохимических процессов, обеспечивает сохранение полученного продукта в течение длительного времени. В сухом продукте микроорганизмы теряют возможность использовать растворенные в воде вещества и поддерживать свою жизнедеятельность. Поэтому высокотемпературная сушка является важной технологией сохранности растительного и кормового сырья.

Выбор конкретного способа сушки должен основываться, в первую очередь, на требованиях к качеству конечного продукта. При этом нужно стремиться к минимизации изменений химического состава исходного сырья [4]. Между тем в процессе сушки могут появляться неприятные и недопустимые для продукта органолептические свойства: цвет, вкус, консистенция и т.д. Высокая температура может существенно изменить химический состав исходного сырья, поэтому некоторые показатели по питательным веществам и витаминам нормируются ГОСТами и технологическим инструкциям. Так,

ГОСТ 32065-2013 [5] устанавливает требования к органолептическим показателям сушеных овощей, их физико-химическим показателям, а также пищевой ценности 100 г сушеного продукта (табл. 1).

Все перечисленные показатели зависят от основных параметров сушки, к которым относятся: а) температура сушки,  $t, ^\circ\text{C}$ ; б) длительность сушки,  $\tau$ , мин.; в) исходная влажность сырья, подвергаемого сушке,  $W$ , %.

Определенный показатель качества  $P_i$  сушеного продукта зависит от названных параметров, т.е.

$$P_i = f(t, \tau, W).$$

В свете сказанного целью данной работы является обеспечение требуемых показателей сушеного сырья на основе теоретического определения рациональной совокупности параметров сушки:  $t$ ,  $\tau$  и  $W$ .

### Методы и результаты исследований

Частым дефектом сушеного продукта является его побурение во время сушки. В.Ю. Валушисом установлено, что сушка ломтиков картофеля с температурой сушильного агента свыше  $200^\circ\text{C}$  в конце процесса приводит к ухудшению качества картофеля – побурению, обугливанию, искрению и воспламенению ломтиков (рис. 1).

Таблица 1

Пищевая ценность 100 г сушеных овощей

| Наименование продукции                                 | Углеводы, г | Витамины, мг |                |                |      |       | Калорийность, ккал |
|--|-------------|--------------|----------------|----------------|------|-------|--------------------|
|  |             | β-каротин    | B <sub>1</sub> | B <sub>2</sub> | PP   | C     |                    |
| Морковь столовая сушеная                               | 54,6        | 40           | 0,12           | 0,30           | 2,6  | 0,0   | 275                |
| Свекла столовая сушеная                                | 59,6        | 0,04         | 0,04           | 0,20           | 1,2  | 10,0  | 278                |
| Белые коренья петрушки, сельдерея и пастернака сушеные | 53,7        | -            | 0,06           | 0,20           | 1,8  | 15,0  | 275                |
| Капуста белокочанная сушеная                           | 47,6        | -            | 0,20           | 0,32           | 2,56 | 80,0  | 249                |
| Лук репчатый сушеный                                   | 47,8        | -            | 0,10           | 0,10           | 1,3  | 12,0  | 273                |
| Чеснок сушеный   | 63,6        | -            | 0,24           | 0,24           | 3,0  | 30,0  | 318                |
| Горошек зеленый сушеный                                | 47,5        | 0,50         | 0,04           | 0,45           | 5,6  | 50,0  | 322                |
| Зелень петрушки, укропа, сельдерея сушеная             | 19,4        | 7,76         | 1,94           | 0,97           | 4,07 | 368,6 | 77,6               |

Недопустимо даже побурение продукта. При определении границ побурения картофельных ломтиков и другого растительного сырья Валушис В.Ю. использовал уравнение [1]

$$t = a - b \ln \tau, \quad (1)$$

где  $t$  – температура среды (сушильного агента при конвективной сушке);

$\tau$  – время пребывания сырья при данной температуре;

$a, b$  – постоянные коэффициенты, определяемые экспериментально.

При определении состояния картофельных ломтиков по началу побурения следует брать следующие значения коэффициентов:  $a = 794$ ;  $b = 82$  [1].

Покажем, что уравнение (1) можно свести к известному в теории пастеризации молока уравнению Дальберга-Кука. Для этого уравнение (1) последовательно преобразуем:

$$b \ln \tau = a - t;$$

$$\ln \tau = a/b - (1/a) t.$$

Обозначая  $a/b = A$ ;  $1/a = B$ , приходим к иско- мой форме уравнения Дальберга-Кука

$$\ln \tau = A - Bt. \quad (2)$$

После пересчета имеем значения новых ко- эффициентов:  $A=9,68$ ;  $B=0,013$ .

Таким образом, в целях унификации без- опасных режимов пастеризации, сушки и других видов теплового воздействия на пищевое сырье целесообразно использовать уравнение (2), а не уравнение (1).

Из уравнения (2) следует, что существует бесчисленное множество сочетаний параметров « $t - \tau$ », обеспечивающих безопасную от побуре- ния продукта сушку. Какой конкретно режим вы- брать – принимается с учетом дополнительной информации, чаще всего экономического свой- ства.

При сушке очень влажного сырья первонач- ально высокая температура сушильного агента не представляет опасности, поскольку поверх- ность частиц имеет свободную влагу и нагрева- ется лишь до температуры мокрого термометра, что ниже температуры сушильного агента [1, 3]. Поэтому для таких случаев активным фактором является текущая влажность высушиваемого сырья. Это можно учесть в уравнении (2), доба- вив дополнительный член, т.е.

$$\ln \tau = A - Bt + CW, \quad (3)$$

где  $W$  – влажность сырья, %.

Знак «+» перед последним членом уравнения (3) поставлен потому, что большая влажность сырья позволяет увеличить выдержку  $\tau$  при дан- ной температуре  $t$ .

Нам неизвестны работы по растительному сырью, где бы учитывалась, при определении параметров сушки, текущая влажность матери- ала. Исключение составляют работы по сушке зерна, где предложены формулы, весьма схо- жие по качественному описанию с формулой (3) [6]:

- формула Хатчинсона

$$t = 122 - 5,4 \lg \tau - 44 \lg W;$$

- формула С.Д. Птицына

$$t = \frac{2350}{0,37(100 - W) + W} + 20 - 10 \lg \tau;$$

- формула Г.А. Библика

$$t = 83,6 - 0,9654W + 8,929 \cdot 10^{-3} \cdot W^2 - 4,33 \ln \tau;$$

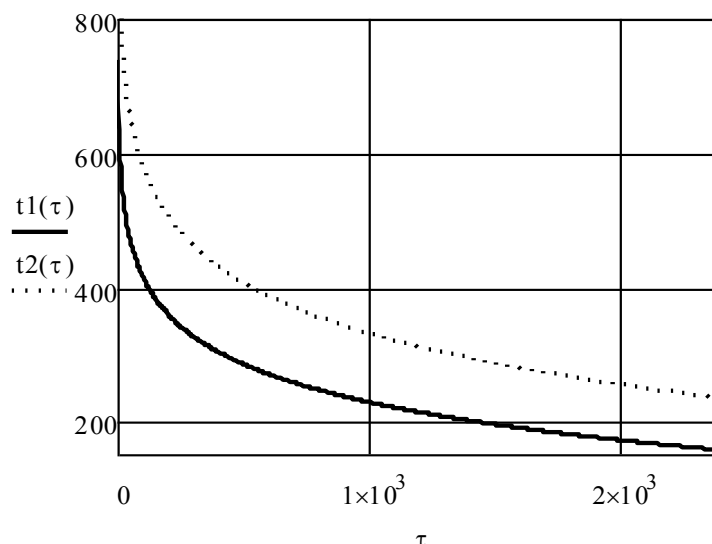
(для  $W = 5...35\%$ );

$$t = 75,48 - 0,45W - 4,33 \ln \tau;$$

(для  $W = 35...45\%$ ).

Следует обратить внимание на то, что в этих формулах член с  $W$  имеет, в противовес урав- нению (3), знак «-». Здесь речь идет о семенном зерне злаковых культур и его термоустойчиво- сти, под которым понимается сохранение жиз- неспособности семян. Знак «-» означает, что чем выше влажность зерна и больше его вы- держка в нагретом состоянии, тем ниже макси- мально допустимая температура нагрева семян [2]. Академиком В.П. Горячкиным было отмече- но, что сухие семена ( $W=3\%$ ) переносят нагрев до температуры 110-120°C и выдержку в нагрет- ом состоянии в течение 20 мин. без понижения всхожести, в то время как сырые и влажные се- мена в значительной степени теряют всхожесть при нагреве лишь до 50-60°C [7].

Такое различие влияние влаги можно объяс- нить ее формой связи в продукте. Если в расти- тельных материалах (овощи, фрукты и т.д.) влажность высока (до 95%), то вода имеет в ос- новном механическую связь. При высокой тем- пературе она легко диффундирует к поверхно- сти частиц, где испаряется и охлаждает продукт.



**Рис. 1. Взаимосвязь температуры ( $t, ^\circ\text{C}$ ) и времени сушки ( $\tau, \text{с}$ ) при побурении ломтиков картофеля (—), их обугливании, искрении и воспламенении (---)**

**Таблица 2**

**Влияние температуры среды и длительности пребывания в ней на переваримость протеина и потери каротина в высушенной траве**

| Показатель                       | Температура, $^\circ\text{C}$ |      |      |
|----------------------------------|-------------------------------|------|------|
|                                  | 160                           | 180  | 200  |
| Переваримость сырого протеина, % |                               |      |      |
| Начальная                        | 82,5                          | 82,5 | 82,5 |
| Через 10 мин.                    | 81,0                          | 81,0 | 40,0 |
| Через 30 мин.                    | 73,0                          | 35,0 | 27,0 |
| Через 60 мин.                    | 47,0                          | 27,0 | 10,0 |
| Содержание каротина, мг/кг       |                               |      |      |
| Начальная                        | 290                           | 290  | 290  |
| Через 10 мин.                    | 250                           | 170  | 70   |
| Через 30 мин.                    | 150                           | 40   | 10   |
| Через 60 мин.                    | 50                            | 20   | 0    |

В зерне вода находится преимущественно в связанном состоянии. Возможности перемещения молекул воды в теле зерновок ограничены. Поэтому высокая температура проникает внутрь зерновок, соответственно, проявляется ее разрушительное действие в отношении всхожести семян.

По мере накопления экспериментальных данных и оценки коэффициентов  $A, B$  и  $C$  в уравнении (4) можно будет предварительно оценивать совокупность параметров  $\tau, t$  и  $W$  по воздействию на продукт, подвергаемый сушке.

Более тонкий подход состоит в учете потерь  $P$  питательных веществ и витаминов в сушеном продукте. Эти потери также зависят от параметров  $\tau, t$  и  $W$ . Поэтому можно предложить соответствующие уравнения регрессии для потерь

$$P = a_0 + a_1 t + a_2 \tau, \quad (4)$$

или более полно

$$P = a_0 + a_1 t + a_2 \tau - a_3 W, \quad (5)$$

где  $a_0 \dots a_3$  – коэффициенты, определяемые экспериментально в лабораторных условиях.

Для подтверждения работоспособности выражения (4) воспользуемся экспериментальными данными по сушке зеленой травы, которые приведены в книге [3] (табл. 2).

Протеиновая и витаминная питательность кормов является их важнейшей характеристикой. Поэтому по изменению этой характеристики в процессе сушки можно оценить требуемые режимы этого процесса.

Попробуем аппроксимировать данные таблицы 2 формой уравнения (4) и определить соответствующие коэффициенты  $a_0, a_1$  и  $a_2$ .

Для примера расчеты проведем по потерям протеина, что важно для бобовых трав (клевер, люцерна, эспарцет, вика). Для злаковых трав показано использование потерь каротина.

В качестве выходной характеристики процесса сушки будем использовать величину

$$Y = P_{\text{исх}} - P_{\text{суш}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{исх}}$  – переваримость протеина в зеленой траве ( $P_{\text{исх}} = 82,5\%$ , табл. 2);

$P_{\text{суш}}$  – переваримость протеина в сушеной траве.

Величина  $Y$  легко рассчитывается по данным таблицы 2.

Для расчета коэффициентов  $a_0, \dots, a_2$  уравнения (4) применим методику планирования эксперимента.

Факторы кодируем по формуле

$$Xi = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (7)$$

где  $Xi$  – кодированное значение  $i$ -го фактора;

$x_i$  – натуральное текущее значение  $i$ -го фактора;

$x_{i0}$  – среднее значение фактора в выбранном интервале;

$\Delta x_i$  – полуинтервал варьирования  $i$ -го фактора:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{2}. \quad (8)$$

После кодирования основные уровни факторов принимают обычно значения: -1; 0; +1. Для звездных точек кодированные значения могут быть больше «+1» и меньше «-1».

Каждому фиксированному набору уровней факторов соответствует определенная точка в факторном пространстве. В процессе проведения эксперимента в нашем случае изменяются факторы  $t$  и  $\tau$ .

Полученные кодированные значения факторов, а также их натуральные значения представлены в таблице 3.

Таблица 3

Факторы и их уровни

| Фактор                  | Уровни варьирования факторов |           |          |
|-------------------------|------------------------------|-----------|----------|
| $t$ °C, ( $X_1$ )       | 160 (-1)                     | 180 (0)   | 200 (+1) |
| $\tau$ , мин. ( $X_2$ ) | 10 (-1)                      | 30 (-0,2) | 60 (+1)  |

Итак, наше уравнение регрессии будем разыскивать в виде:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2. \quad (9)$$

Для получения уравнения регрессии используем систему *MathCAD 15*. Для расчета коэффициентов полинома  $n$ -ной степени вызываем функцию *polyfitc* ( $X, Y, n$ ) (рис. 2). В полученной таблице нам нужны первые два столбца. Символ  $A$  соответствует нашему первому фактору, символ  $B$  – второму. Свободный член обозначается как *Intercept*. Коэффициенты для этих членов представлены во втором столбце.

Функция *polyfitc* ( $X, Y, n$ ) позволяет легко менять  $n$  – степень аппроксимирующего многочлена. Кроме линейного многочлена (9) были опробованы многочлены 2-й и 3-й степени. Оказалось, что они не дают большей точности, чем простой многочлен (9).

По результатам расчетов уравнение регрессии в кодированном виде было записано так:

$$Y(X_1, X_2) = 36,92 + 20,50 X_1 + 19,51 X_2. \quad (10)$$

Графическая иллюстрация этой зависимости приведена на рисунке 3.

Наглядно видно, что в процессе сушки происходит снижение переваримости протеина, при этом факторы  $X_1$  и  $X_2$  практически равнозначны по своему негативному воздействию.

Примем, что снижение переваримости протеина не должно превышать 30%. Это означает, что величина  $Y$  должна составлять:

$$Y = 0,3 P_{\text{исх}} = 0,3 \cdot 82,5 \approx 24,8.$$

Подставляя это значение в уравнение регрессии (10), будем иметь

$$24,8 = 36,90 + 20,50 X_1 + 19,51 X_2, \quad \text{или} \quad 20,50 X_1 + 19,51 X_2 + 12,10 = 0. \quad (11)$$

Варьируя  $X_1$  и  $X_2$  так, чтобы они удовлетворяли уравнению (11), можно подобрать сочетание этих факторов. Пусть, например,  $X_1 = 0$  (т.е.  $t = 180^\circ\text{C}$ ), тогда из уравнения (11) следует, что

$$X_2 = -12,1 / 19,5 = -0,62.$$

На основе (8) имеем

$$\tau - \tau_0 = X_2 \cdot \Delta \tau,$$

т.е.  $\tau - 35 = (-0,62) \cdot 25$ , откуда  $\tau = 19,5$  мин.

Итак, имеем рациональные параметры  $t=180^\circ\text{C}$ ,  $\tau=19,5$  мин., допускающие снижение переваримости протеина при сушке не более, чем на 30%.

Сообразуясь с выражением (11), можно подобрать и другие режимы сушки, допускающие такое же снижение.



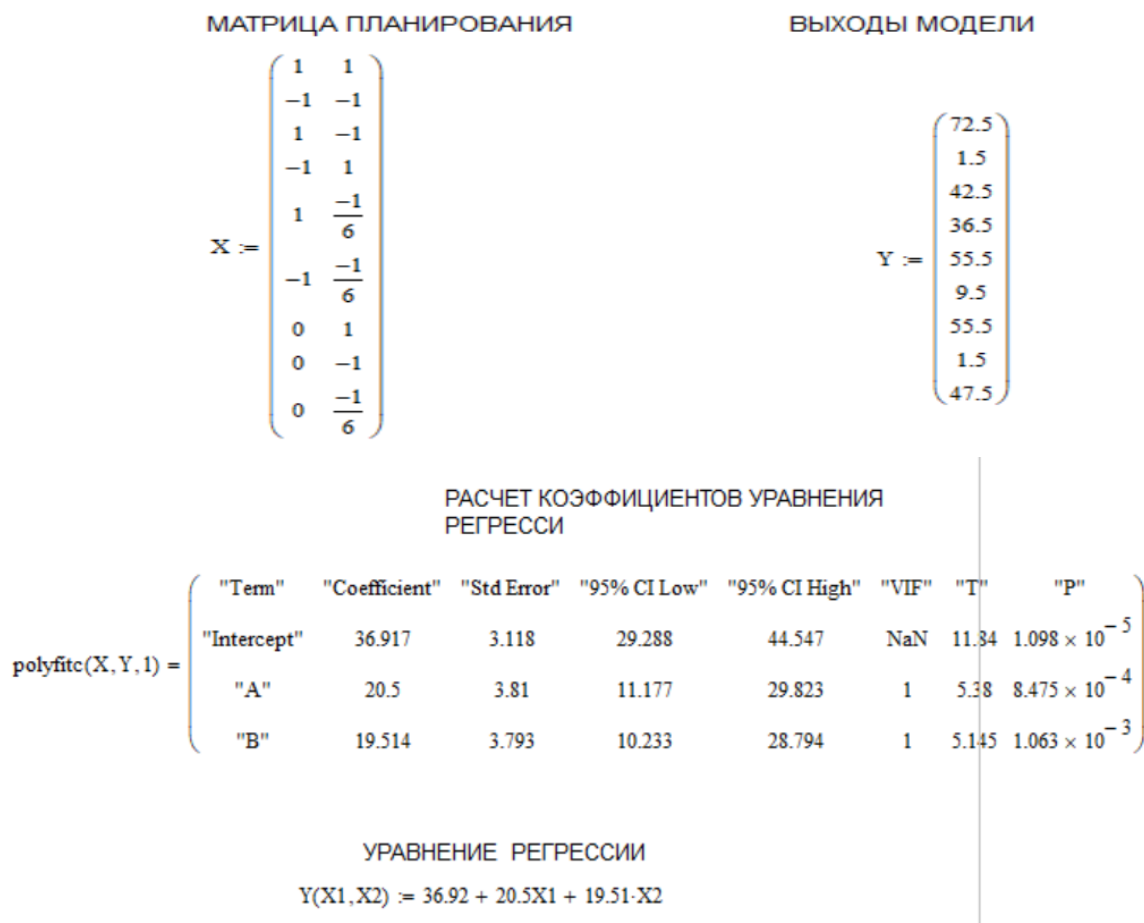


Рис. 2. Листинг документа MathCAD

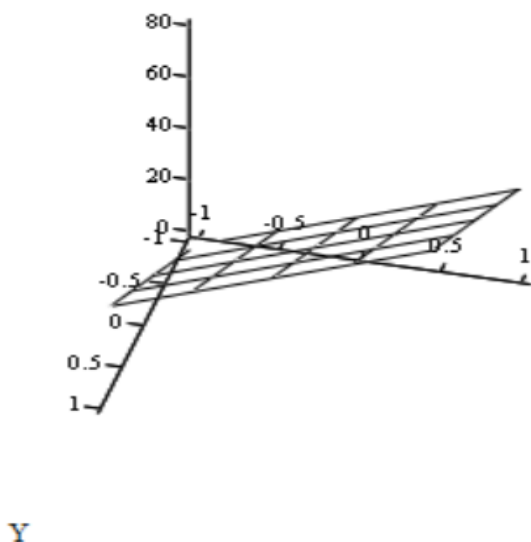


Рис. 3. Поверхность отклика для функции снижения переваримости протеина

Режим с  $t=180^{\circ}\text{C}$  и  $t=19,5 \text{ мин.}$ , возможно, достаточен для сушки травы до требуемых значений влажности. Для высоковлажных овощей – это, скорее всего, первая стадия сушки. После ее целесообразно переходить к вакуумной ста-

дии сушки. Далее опять температурная сушка, но с новыми (уменьшенными) параметрами сушки, учитывая достигнутый съем влаги из продукта. Потом опять вакуумная стадия. Такое чередование длится до тех пор, пока не будет достигнута требуемая влажность сушеного продукта.

Встает вопрос: по потерям каких веществ или характеристик выбирать режимы сушки? По траве мы выбрали снижение переваримости протеина (для бобовых трав).

Обратимся к таблице 1. Видим, что морковь является «чемпионом» по содержанию б-каротина. Его и следует сохранять, в первую очередь, в процессе сушки. На основе этого показателя и нужно подбирать режимы сушки. Зеленные культуры нужно сушить с параметрами, обеспечивающими минимизацию потерь витаминного комплекса.

Исчерпывающей информацией, позволяющей достоверно подбирать режимы сушки,

является наличие конкретной зависимости (5) для определенного вида овощей и их питательных характеристик. Такие зависимости могут быть получены в лабораторных условиях с использованием методики активного планирования эксперимента. В таком эксперименте одновременно варьируются в нужных пределах величины  $t$ ,  $\tau$  и  $W$ . При этом нужные уровни величины  $W$  могут быть получены механическим отжатием влаги.

Получение таких характеристик является программой наших дальнейших экспериментальных исследований.

### Выводы

1. Установлено, что безопасные от побурения продукта режимы сушки растительных материалов описываются известным в теории пастеризации молока уравнением Дальберга-Кука. Это предполагает множество режимов сушки с определенным набором параметров: время – экспозиция сушки.

2. Окончательный подбор режима сушки должен проводиться на основе зависимостей, отражающих потери питательных и других веществ растительного сырья в процессе сушки. Предложена методика получения таких зависимостей, которая продемонстрирована на расчёте процесса сушки бобовых трав.

### Библиографический список

1. Валушис, В. Ю. Основы высокотемпературной сушки кормов / В. Ю. Валушис. – Москва: Колос, 1977. – 304 с. – Текст: непосредственный.
2. Сакун, В. А. Сушка и активное вентилирование зерна и зеленых кормов / В. А. Сакун. – Москва: Колос, 1974. – 216 с. – Текст: непосредственный.
3. Уайт, Р. Сушка зеленых кормов / Р. Уайт, М. Йео; перевод с английского. – Москва: Изд-во иностранной лит-ры, 1954. – 236 с. – Текст: непосредственный.
4. Тепляшин, В. Н. Технология оборудования для сушки и растительного сырья / В. Н. Тепляшин, Л. И. Ченцова, В. Н. Невзоров; Красноярский гос. аграрн. ун-т. – Красноярск, 2019. – 173 с. – URL: <http://www.kgau.ru/new/student/43/content/54.pdf>. – Текст: электронный.

5. ГОСТ 32065-2013. Межгосударственный стандарт. Овощи сушеные. Общие технические условия. Издание официальное. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2014. – 16 с. – Текст: непосредственный.

6. Бибики, Г. А. Аналитическая зависимость предельной температуры нагрева зерна от влажности и длительности сушки / Г. А. Бибики. – Текст: непосредственный // Вестник АПК Верхневолжья. – 2015. – № 1 (29). – С. 64-66.

7. Горячкин, В. П. Собрание сочинений: в 3 томах. Том 3 / В. П. Горячкин. – Москва: Колос, 1965. – 384 с. – Текст: непосредственный.

### References

1. Valushis V.Yu. Osnovy vysokotemperaturnoy sushki kormov / V.Yu. Valushis. – Moskva: Kolos, 1977. – 304 s.
2. Sakun V.A. Sushka i aktivnoe ventilirovaniya zerna i zelenykh kormov / V.A. Sakun. – Moskva: Kolos, 1974. – 216 s.
3. Uayt R. Sushka zelenykh kormov. Per. s angl. / R. Uayt, M. Yeo. – Moskva: Izd-vo inostranoy lit-ry, 1954. – 236 s.
4. Teplyashin V.N. Tekhnologiya oborudovaniya dlya sushki i rastitelnogo syrya / V.N. Teplyashin, L.I. Chenchova, V.N. Nevzorov: Krasnoyarskiy gos. agrarn. un-t. – Krasnoyarsk, 2019. – 173 s. – URL: <http://www.kgau.ru/new/student/43/content/54.pdf>.
5. GOST 32065-2013. Mezghosudarstvennyy standart. Ovoshchi sushchenye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Izdanie ofitsialnoe. – Moskva: FGUP «Standartinform», 2014. – 16 s.
6. Bibik G.A. Analiticheskaya zavisimost predelnoy temperatury nagreva zerna ot vlazhnosti i dlitelnosti sushki / G.A. Bibik // Vestnik APK Verkhnevolzhya. – 2015. – No. 1 (29). – S. 64-66.
7. Goryachkin V.P. Sbranie sochineniy v 3-kh tomakh. Tom 3 / V.P. Goryachkin. – Moskva: Kolos, 1965. – 384 s.

*Работа выполнена при финансовой поддержке краевого автономного учреждения «Алтайский центр кластерного развития» (хоздоговор № 51/5).*

