

УДК 664.723

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ СУШКИ ПУХА РОГОЗА В КОНВЕКТИВНОЙ СУШИЛКЕ**Протасов С.К., Боровик А.А., Брайкова А.М.***Белорусский государственный экономический университет*

Приведены опытные кривые сушки для различных параметров, изменяющих свои значения: скорости и температуры сушильного агента, начального влагосодержания и высоты слоя пуха, начальной кажущейся плотности пуха рогоза. Определено время сушки пуха до равновесного влагосодержания для этих параметров. Приведены формулы расчета времени сушки для каждого из рабочих параметров. Получена общая формула расчета времени сушки пуха в зависимости от значений всех параметров одновременно.

Ключевые слова: пух рогоза, время сушки, влагосодержание, температура, высота слоя, плотность, скорость, зависимости.

CALCULATION OF THE DRYING TIME OF CATTAIL FLUFF IN A CONVECTIVE DRYER**Protasov S.K., Borovik A.A., Braykova A.M.***Belarusian State University of Economics*

Experimental drying curves are given for various parameters that change their values: the speed and temperature of the drying agent, the initial moisture content and height of the fluff layer, the initial apparent density of cattail fluff. The drying time of the fluff to the equilibrium moisture content for these parameters is determined. Formulas for calculating the drying time for each of the operating parameters are given. A general formula for calculating the drying time of fluff depending on the values of all parameters at the same time is obtained.

Key words: cattail fluff, drying time, moisture content, temperature, layer height, density, speed, dependencies.

Пух рогоза можно использовать как сорбент при ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на водной поверхности [1,2]. Рогоз — высокая болотная трава, которая растет по берегам водоёмов, на мелководьях, на травяных болотах, а также в других сырых и мокрых местах: канавах, кюветах, заброшенных карьерах, по обочинам дорог. Стебель рогоза заканчивается цилиндрическим початком темно-бурого цвета. Початок состоит из множества пушинок, которые плотно в нем упакованы. Пушинки расположены вокруг стебля, обеспечивающего их питанием. Сама пушинка состоит из стволика и прикрепленных к нему множества волосинок, образующих древовидную форму. После созревания и естественного высыхания пушинки расправляются, отделяются от стебля и рассеиваются воздушными потоками в окружающую среду. Сорбционная емкость пуха обеспечивается свободным пространством между волосинками и стволиками пушинок, а также между самими пушинками [2]. К сорбентам предъявляют следующие наиболее существенные требования: сорбционная емкость, плавучесть, возможность регенерации, доступная утилизация и длительное хранение. Для использования пуха в качестве сорбента, початки необходимо собрать сразу после их созревания, поскольку с течением времени качество пуха в початках снижается. Свежеубранные початки рогоза имеют высокое влагосодержание (порядка 140 – 150 %), которое способствует развитию различных микроорганизмов, плесени и грибов [3].

Для хранения пуха необходимо снизить количество влаги до величины, при которой исключается возможность жизнедеятельности плесени, грибов, микроорганизмов и личинок насекомых. Например, для нормальной жизнедеятельности бактерий требуется не менее 30%, а для развития плесени – не менее 15% влаги. Удаление влаги до определенной величины исключает возможность протекания микробиологических и биохимических процессов и обеспечивает сохранность пуха в течение длительного времени без порчи. Установлено, что большинство видов растительного сырья хорошо хранится при влагосодержании 12–15% [4]. Для пуха рогоза проведены исследования по определению равновесного влагосодержания в помещении с температурой воздуха 19 °С и относительной влажности 49% [3]. Указанные температура и относительная влажность являются вероятными в промышленных условиях хранения рогоза. Установлено, что равновесное влагосодержание для указанных параметров составляет 11%. Это на 1% ниже минимального влагосодержания для растительного сырья. Определение длительности хранения пуха, высушенного до влагосодержания 11%, проведено в работе [5]. С этой целью образцы пуха были помещены в матерчатые сетчатые мешки и подвешены в помещении при температуре 18–20 °С и относительной влажности 46–50%. В течение 3-х лет величина влагосодержания пуха колебалась в пределах 11–12%. При этом состояние пуха не изменялось, то есть отсутствовали поражения плесенью, грибами и иными микроорганизмами. Таким образом, чтобы защитить пух рогоза от порчи и обеспечить его качественную длительную сохранность, необходимо после уборки высушить его до влагосодержания 11%. При этом условия хранения должны соответствовать температуре воздуха 18–20 °С и относительной влажности 46–50%.

Для производственных условий важнейшим параметром сушки является время достижения равновесного состояния пуха. Время сушки можно определить с помощью опытной графической зависимости влагосодержания пуха от времени (кривой сушки). Для этого задают необходимое конечное влагосодержание и по кривой сушки определяют требуемое время сушки. На продолжительность сушки пуха рогоза оказывают существенное влияние следующие параметры: t – температура сушильного агента на входе в сушилку; ω – скорость движения сушильного агента через слой пуха; u_n – влагосодержание пуха в начале сушки; h – толщина слоя пуха; ρ – кажущаяся плотность пуха в начале сушки. Влияние каждого из этих параметров в отдельности на кинетику и время сушки исследованы авторами, и результаты этих исследований приведены в работах [5–8]. В работах приведены формулы для расчета времени сушки пуха рогоза до равновесного влагосодержания 11% для каждого в отдельности изменяющегося параметра: температуры и скорости сушильного агента, влагосодержания, толщины слоя и плотности пуха в начале сушки.

Целью данной работы является получение формулы для расчета времени сушки пуха рогоза до равновесного влагосодержания в зависимости от значений всех указанных пяти параметров одновременно.

Объекты и методы исследования

Кривые сушки при различной температуре сушильного агента на входе в сушилку представлены на рис.1 [5]. Данные получены при фиксированных остальных параметрах процесса: $\omega = 0,44\text{м/с}$; $i_n = 0,58\text{кг/кг}$; $\rho = 80\text{ кг/м}^3$; $h = 180\text{ мм}$.

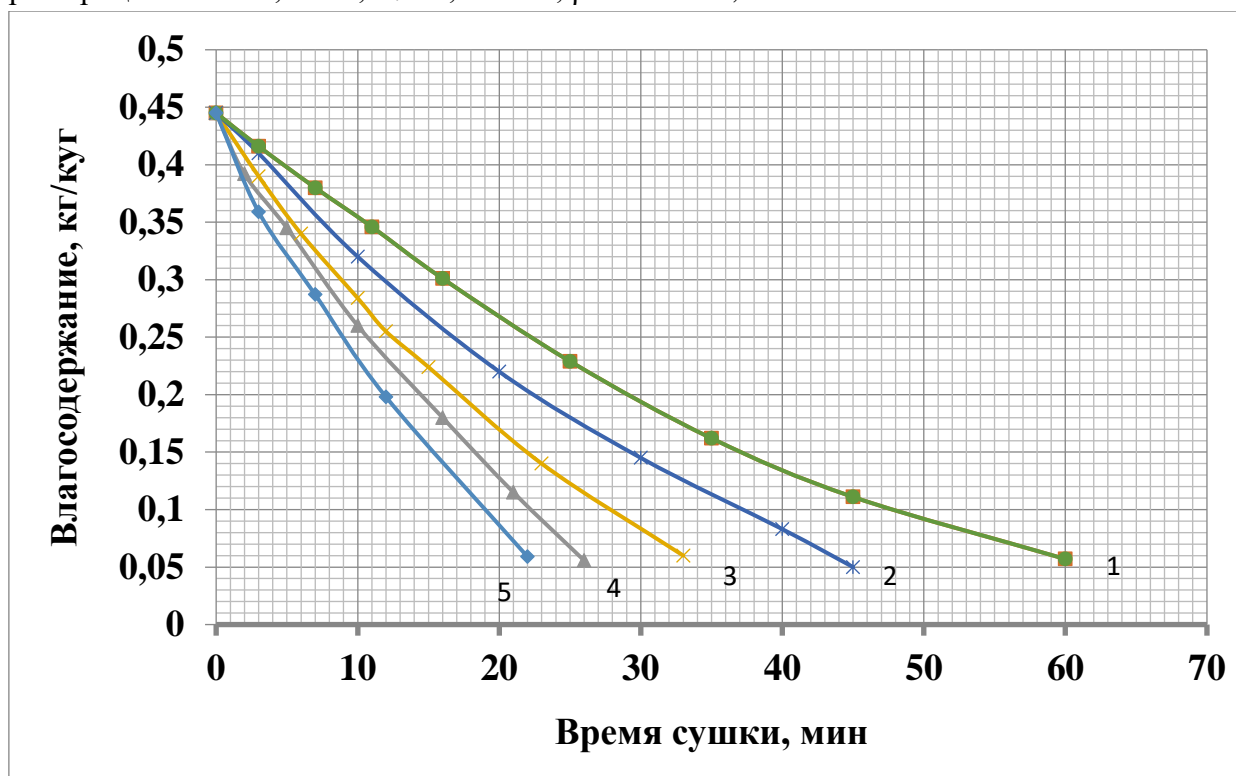


Рисунок 1. Кривые сушки пуха при различной температуре сушильного агента на входе в сушилку: 1 – 60; 2 – 70; 3 – 80; 4 – 90; 5 – 100 °С.

С помощью рис.1 определено время сушки до равновесного влагосодержания пуха 0,11 кг/кг при температурах: 60, 70, 80, 90; и 100 °С. В Excel построена графическая зависимость времени сушки от температуры сушильного агента (рис.2), которая описывается полиномиальной зависимостью во второй степени с коэффициентом детерминации $R^2 = 1$.

$$\tau = 0,0111t^2 - 2,4464t + 151,94, \quad (1)$$

где τ - время сушки, мин; t – температура воздуха °С.

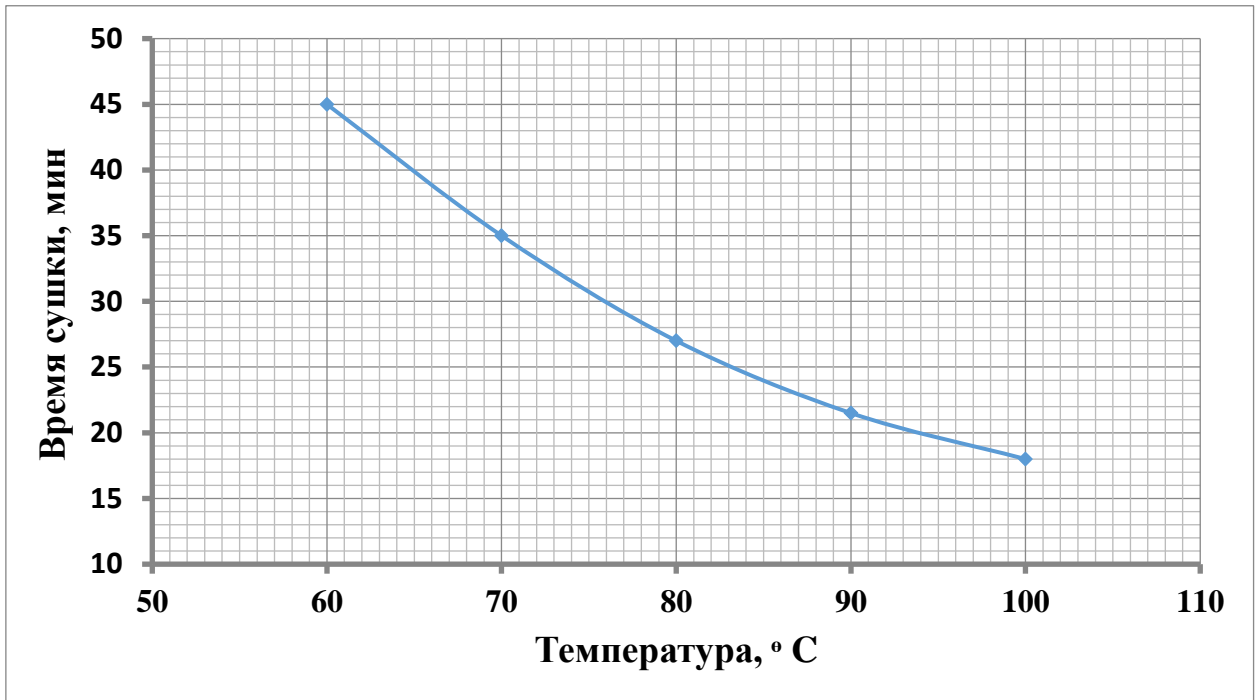


Рисунок 2. Зависимость времени сушки пуха от температуры сушильного агента на входе в сушилку.

Кривые сушки для различных скоростей движения сушильного агента через слой пуха получены в работе [5] и представлены на рис.3. Опыты проведены при постоянных: $u_n = 0,58 \text{ кг/кг}$; $\rho = 99 \text{ кг/м}^3$; $h = 180 \text{ мм}$; $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

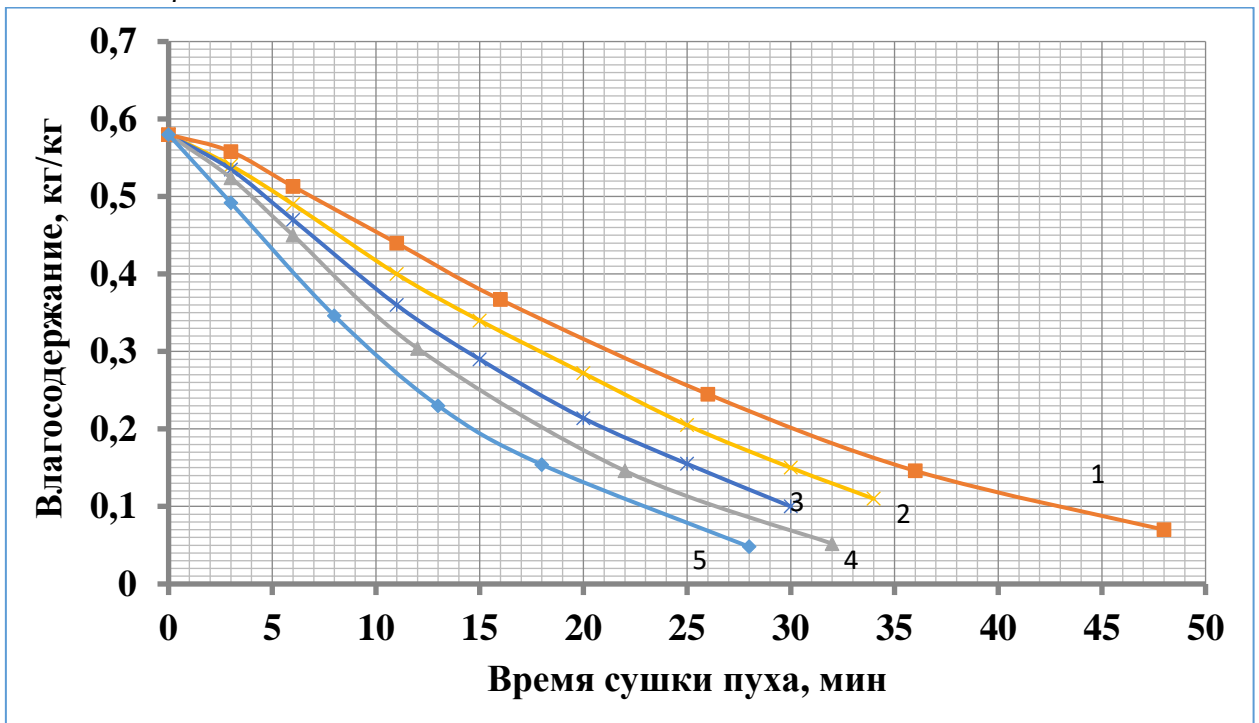


Рисунок 3. Кривые сушки пуха при скоростях сушильного агента в слое: 1 - 0,22 м/с; 2 - 0,3 м/с; 3 - 0,4 м/с; 4 - 0,44 м/с; 5 - 0,662 м/с.

С помощью этих кривых определено время сушки до влагосодержания пуха 0,11 кг/кг при скоростях сушильного агента: 0,22, 0,3, 0,4, 0,44 и 0,662 м/с. В Excel построена графическая зависимость времени сушки от скорости сушильного агента (рис. 4), которая описывается полиномиальной зависимостью во второй степени с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9995$.

$$\tau = 127,8 \omega^2 - 155,77 \omega + 69,115, \quad (2)$$

где τ - время сушки, мин; ω - скорость сушильного агента, м/с.

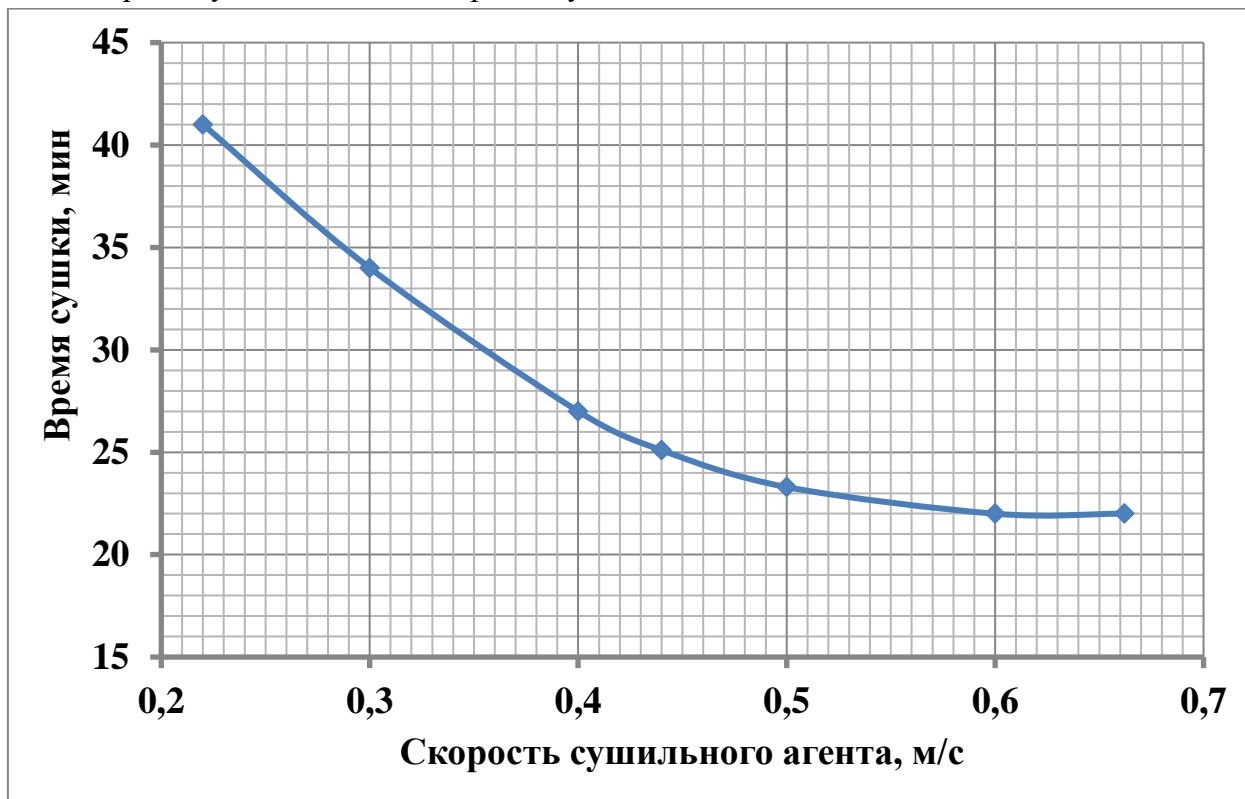


Рисунок 4. Зависимость времени сушки пуха от скорости сушильного агента.

Для различного начального влагосодержания пуха кривые сушки получены в работе [6] и представлены на рис.5. Данные достоверны для условий: $\omega = 0,44$ м/с; $\rho = 100$ кг/м³; $h = 180$ мм; $t = 100$ °С.

Определено время сушки пуха до влагосодержания 0,11 кг/кг при начальном влагосодержании: 1,1; 0,95; 0,833; 0,7; 0,58 кг/кг. В Excel построена графическая зависимость (рис.6), которая описывается квадратичной зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 = 1$.

$$\tau = 136,6 u_n - 49,44 u_n^2 - 38,56, \quad (3)$$

где τ - время сушки, мин; u_n - начальное влагосодержание пуха, кг/кг.

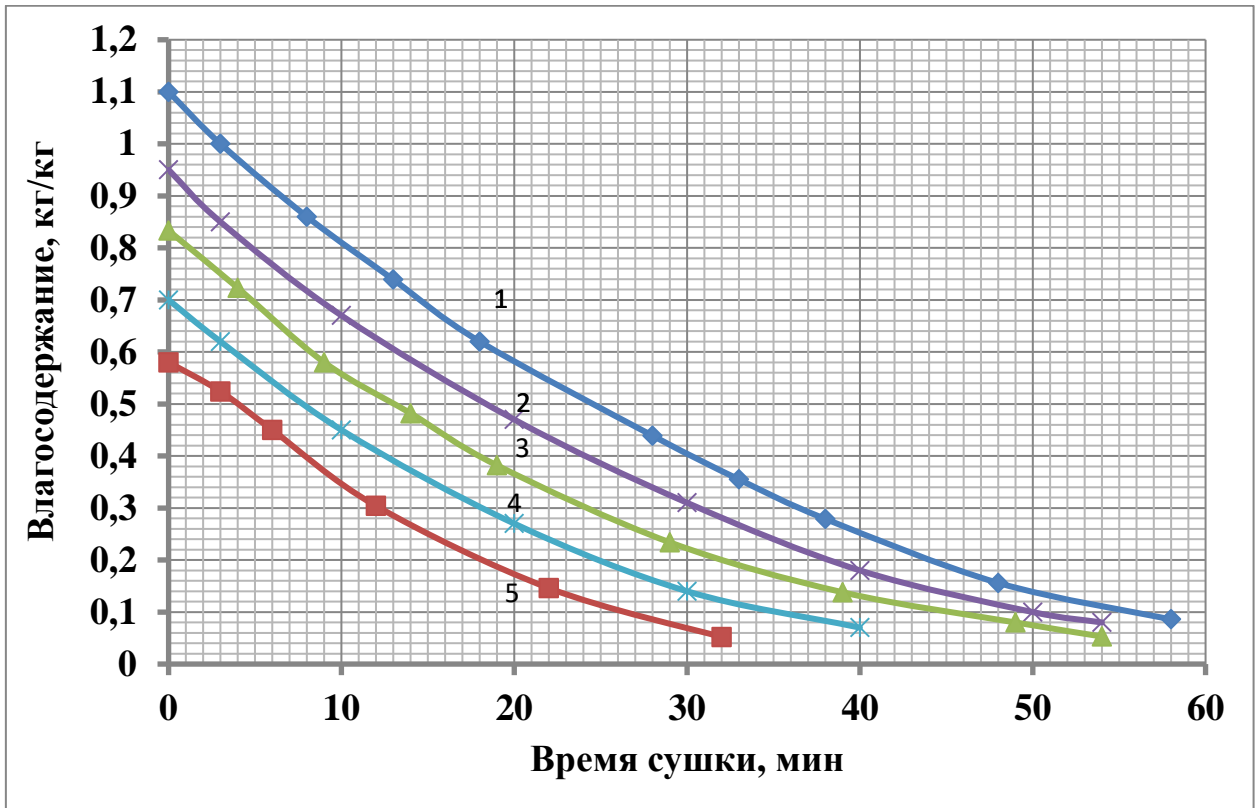


Рисунок 5. Кривые сушки при различном начальном влагосодержании пуха рогоза: 1- 1,1; 2 – 0,95; 3 – 0,833; 4 – 0,7; 5 – 0,58 кг/кг.

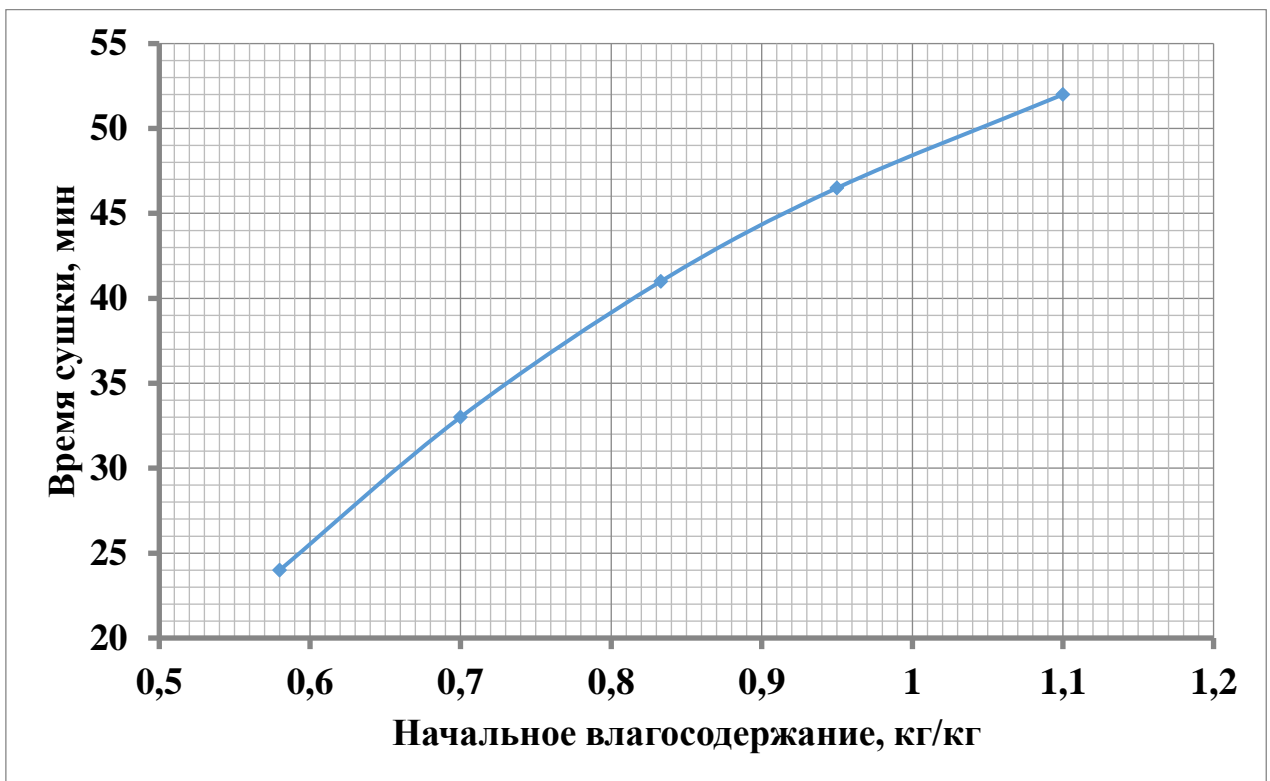


Рисунок 6. Зависимость времени сушки от начального влагосодержания пуха.

На рис. 7 изображены кривые сушки для различной высоты слоя пуха [7]. Исследования были проведены при постоянных $\omega = 0,44\text{м/с}$; $\rho = 100\text{ кг/м}^3$; $t = 70^\circ\text{ C}$; $u_n = 0,58\text{кг/кг}$.

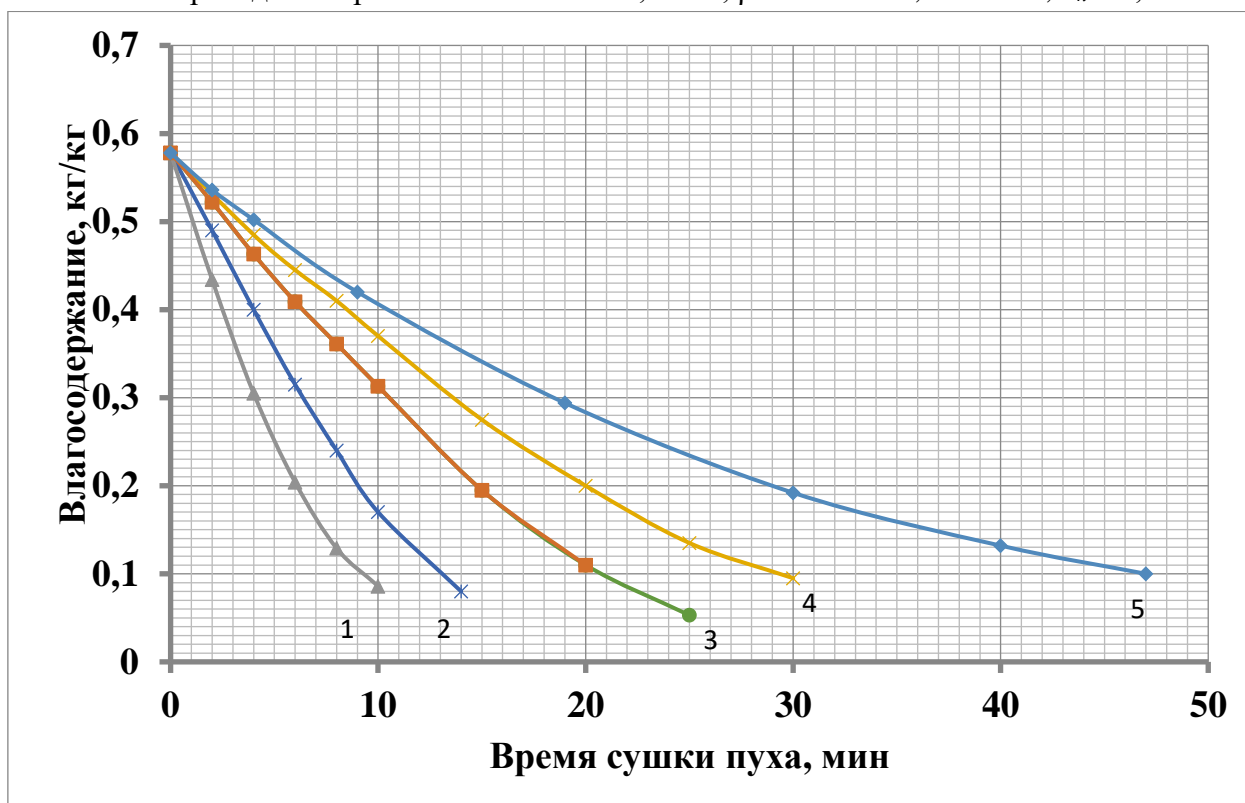


Рисунок 7. Кривые сушки пуха при высоте слоя: 1- 65, 2 – 100, 3- 130, 4 – 150, 5 – 180 мм.

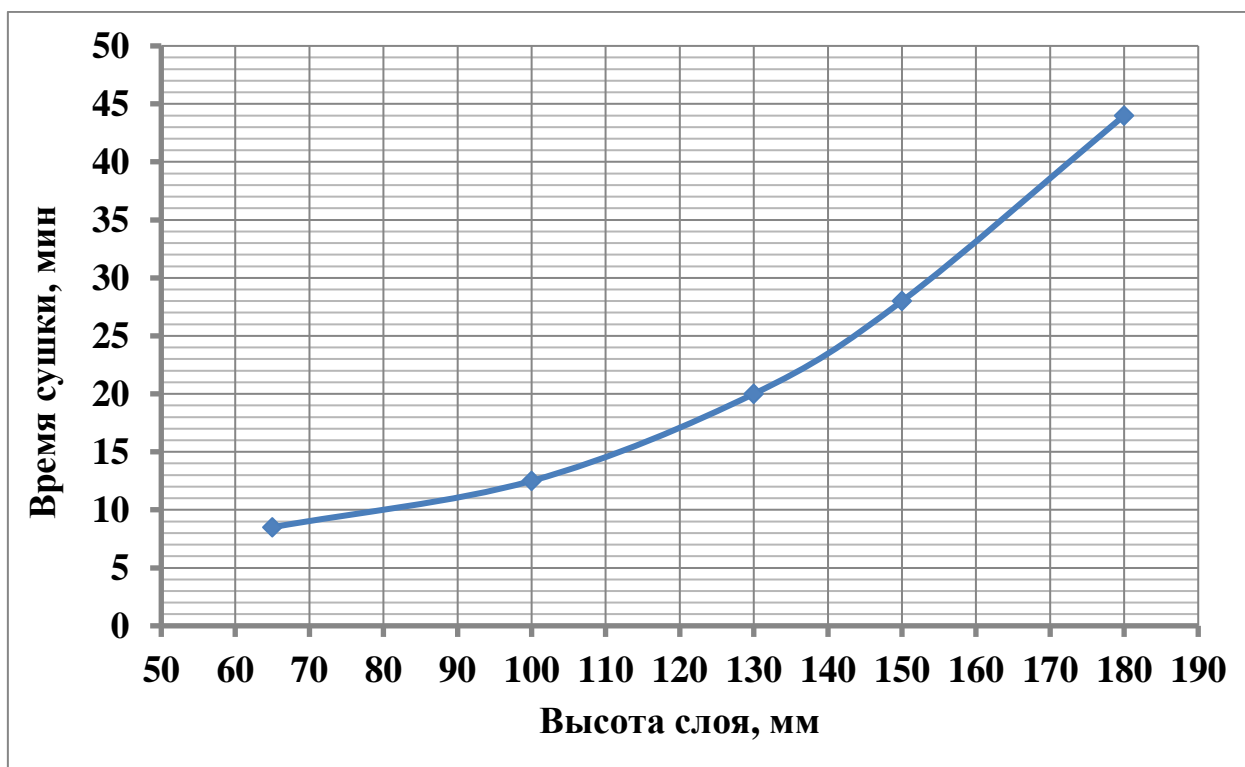


Рисунок 8. Зависимость времени сушки от высоты слоя пуха.

Определено время сушки пуха для высот слоя: 65, 100, 130, 150 и 180 мм. В Excel построена графическая зависимость (рис. 8), которая описывается зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 = 1$.

$$\tau = 0,0026 h^2 - 0,3238 h + 18,796, \quad (4)$$

где τ - время сушки, мин; h - высота слоя пуха, мм.

Кривые сушки при различной начальной кажущейся плотности пуха представлены на рис. 9 [8]. Опытные данные на рис. 9 получены при $\omega = 0,44\text{м/с}$; $h = 180\text{ мм}$; $t = 80^\circ\text{С}$; $u_n = 0,58\text{кг/кг}$.

По кривым сушки установлено время сушки пуха до влагосодержания 11% и построена графическая зависимость (рис.10). Данные математически обработаны и получена расчетная зависимость:

$$\tau = 0,0214 \rho^2 - 3,27 \rho + 153,48, \quad (5)$$

где τ - время сушки, мин; ρ - начальная кажущаяся плотность пуха, кг/м^3 . $R^2 = 0,9995$.

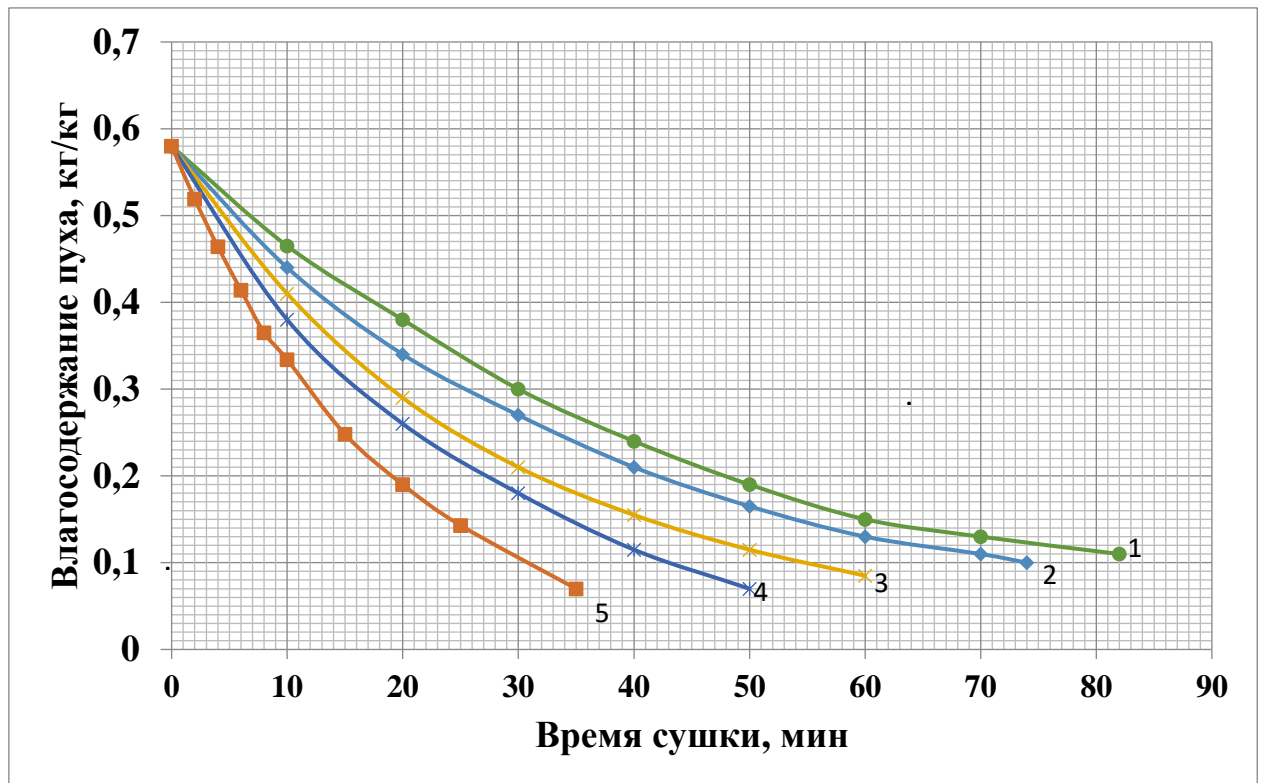


Рисунок 9. Кривые сушки при различной начальной кажущейся плотности пуха: 1 – 127; 2 – 120; 3 – 110; 4 – 100; 5 – 80 кг/м^3 .

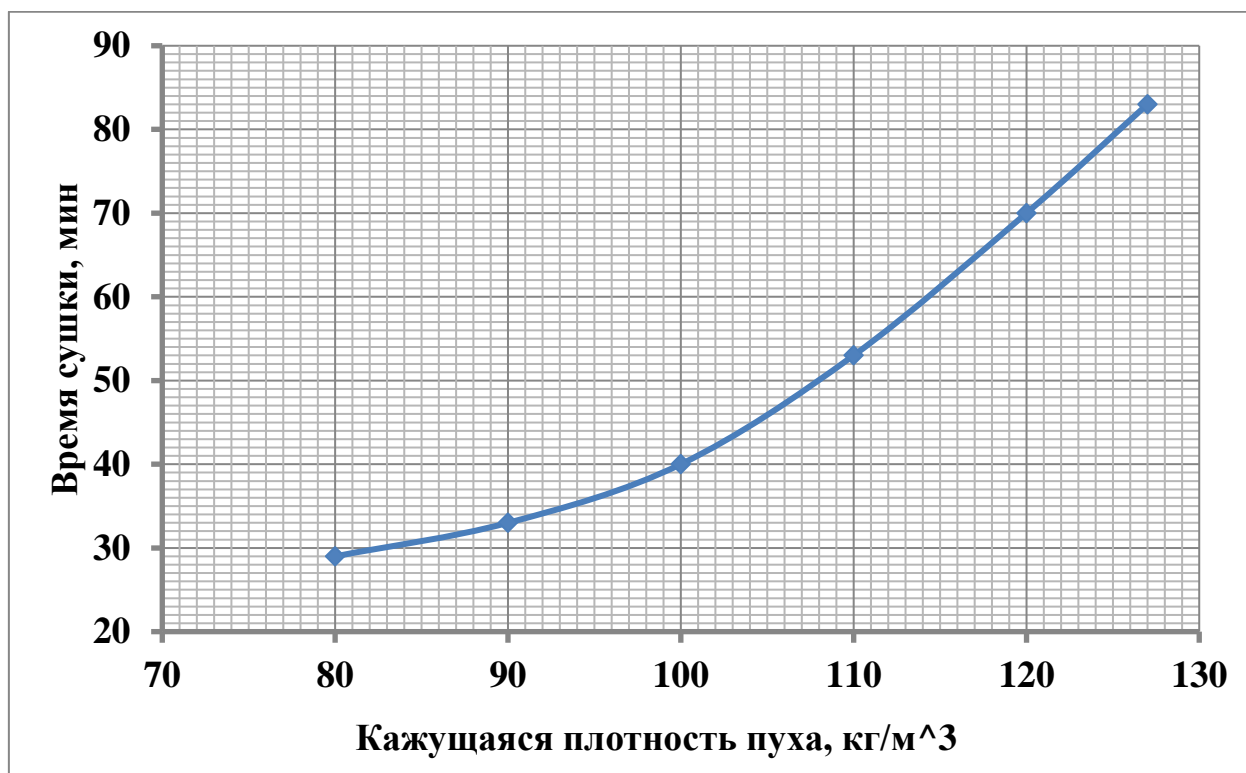


Рисунок 10. Зависимость времени сушки от начальной кажущейся плотности пуха.

Для определения времени сушки пуха рогоза в конвективной сушилке в зависимости от всех пяти параметров одновременно предложено формула следующего вида:

$$\tau = A \times (0,0111t^2 - 2,4464t + 151,94) \times (127,8 \omega^2 - 155,77 \omega + 69,115) \times (136,6 u_n - 49,44 u_n^2 - 38,56) \times (0,0026 h^2 - 0,3238 h + 18,796) \times (0,0214 \rho^2 - 3,27 \rho + 153,48),$$

где τ - время сушки, мин; t - температура сушильного агента, °C; ω - скорость сушильного агента, м/с; u_n - начальное влагосодержание пуха, кг/кг; h - высота слоя пуха, мм; ρ - начальная плотность пуха, кг/м³.

В этой формуле коэффициент A определялся с помощью полученных опытных данных для всех пяти параметров. Первоначально определялся коэффициент A по данным изменяющейся температуры сушильного агента и постоянных скорости сушильного агента, начальной плотности пуха, высоте слоя пуха и плотности пуха. Получено среднее значение коэффициента $A_t = 1,26 \times 10^{-6}$.

Аналогично получены значения коэффициента A по опытным данным изменяющихся:

$$\text{скорости сушильного агента } A_\omega = 1,24 \times 10^{-6};$$

$$\text{начального влагосодержания пуха } A_{u_n} = 1,202 \times 10^{-6};$$

$$\text{высоты слоя пуха } A_h = 1,16 \times 10^{-6};$$

$$\text{кажущейся начальной плотности пуха } A_\rho = 1,236 \times 10^{-6}.$$

Среднеарифметическое значение коэффициента A для общей формулы

$$A_{\text{ср}} = (1,26 + 1,24 + 1,202 + 1,16 + 1,236) \times 10^{-6} / 5 = 1,22 \times 10^{-6}.$$

В результате получена формула для расчета времени сушки пуха рогоза в конвективной сушилке в зависимости от пяти параметров:

$$\tau = 1,22 \times 10^{-6} \times (0,0111t^2 - 2,4464t + 151,94) \times (127,8 \omega^2 - 155,77 \omega + 69,115) \times (136,6 u_n - 49,44 u_n^2 - 38,56) \times (0,0026 h^2 - 0,3238 h + 18,796) \times (0,0214 \rho^2 - 3,27 \rho + 153,48). \quad (6)$$

Погрешность расчетов не превышает 8%.

Формула (6) справедлива для следующих диапазонов изменения параметров: температура от 60 до 100 °С; скорость теплоносителя от 0,22 до 0,662 м/с; начальное влагосодержание от 0,58 до 1,1 кг/кг; высота слоя от 65 до 180 мм; плотность пуха от 80 до 127 кг/м³.

Выводы

1. Получена формула для расчета времени сушки пуха рогоза до равновесного влагосодержания 11%, в зависимости от значений пяти рабочих параметров одновременно.
2. Погрешность расчетов по формуле (6) не превышает 8 %.

Список литературы

1. Горовых, О. Г. Волоски околоцветника початков рогоза как природный сорбент нефти и нефтепродуктов. // О. Г. Горовых, Б. А. Альжанов // Международный научный журнал «Наука и Мир». № 4 (68), апрель. – Volgograd : 2019. – С. 51–57.
2. Горовых, О. Г. Использование волосков околоцветника початков рогоза для очистки водных объектов от нефтяных загрязнений // О. Г. Горовых, К. Ф. Саевич, Б. А. Альжанов // Труды БГТУ, серия 2, «Химические технологии и геоэкология», № 2 (223), 2019. – С. 183–192.
3. Протасов С.К. Исследование процессов сушки пуха рогоза. // С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова. // Мичуринский агрономический вестник. 2021. №1. С. 87-96.
4. Рыкова, Л. И. Основы микробиологического контроля консервного производства. // Л. И. Рыкова, М. И. Черняева. // М. Пищевая промышленность, 1967. – 404 с.
5. Протасов, С.К. Конвективная сушка пуха рогоза // С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник, - №1 - 2022 – С. 63 – 69.
6. Протасов С.К. Исследование кинетики сушки пуха рогоза. // С.К. Протасов, А.А. Боровик, О.Г. Горовых, А.М. Брайкова // Norwegian journal of development of the International Science. 2021. №70. С.36-41.
7. Протасов, С.К. Кинетика сушки природного нефтесорбента – пуха рогоза // С.К. Протасов, А.А. Боровик, О.Г. Горовых, А.М. Брайкова // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. - Том 12, - №2 - 2022 – С. 46 -54
8. Протасов, С.К. Влияние плотности пуха рогоза на кинетику сушки. // С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник, - №1 - 2023 – С. 63 – 69.

Протасов Семен Корнеевич, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет

220086, г. Минск, ул. Калиновского, д. 58, кв. 32

Телефон: +375172097989

E-mail: semenprotas@mail.ru

Боровик Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет

220028, г. Минск, ул. Великоморская, 10, кв. 6

Телефон: +375172097989

E-mail: semenprotas@mail.ru

Брайкова Алла Мечиславовна, кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой физикохимии материалов и производственных технологий, Белорусский государственный экономический университет

220117, г. Минск, пр. им. газеты «Звезда», д. 28, к. 1, кв. 151

Телефон: +37517209-79-27

E-mail: semenprotas@mail.ru