

УДК 662.641.047

Поступила в редакцию 30.11.2025
Received 30.11.2025

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СУШКИ ТОРФЯНЫХ ГРАНУЛ

М. Г. Калантаров¹, А. И. Сорокин¹, Н. Н. Шилович², Ю. Г. Янута¹

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²Белорусский государственный экономический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе проведен анализ основных методов сушки торфяных гранул в нагретом барабане: с вытеснением влаги наружу непрогретым воздухом, с вытеснением влаги наружу и частичной рециркуляцией отработанного сушильного агента, с вытеснением влаги наружу непрогретым воздухом с рекуперацией тепла из отработанного влажного агента. Рассмотрен также процесс сушки торфяных гранул в барабане интенсивным электромагнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ) с вытеснением влаги наружу непрогретым воздухом. Дана оценка основных параметров процесса конвективной сушки с целью выбора оптимальных условий его протекания, позволяющих сократить расход потребляемой энергии для получения конечного продукта. Для рассмотренных методов сушки торфяных гранул приводятся аналитические зависимости оценки оптимальных параметров сушильного агента при равновесии между высушиваемым материалом и сушильной средой.

Ключевые слова: барабан; влагосодержание; влажность; давление; гранула; температура; теплоемкость; теплосодержание; энтальпия.

Для цитирования. Калантаров М. Г., Сорокин А. И., Шилович Н. Н., Янута Ю. Г. Анализ методов сушки торфяных гранул // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 156–171.

ANALYSIS OF PEAT GRANULES DRYING METHODS

M. G. Kalantarov¹, A. I. Sorokin¹, N. N. Shilovich², Yu. G. Yanuta¹

¹Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

²Belarusian State Economic University, Minsk, Belarus

Abstract. This paper analyzes the main methods of drying peat pellets in a heated drum: with moisture displacement by unheated air, with moisture displacement and partial recirculation of the spent drying agent, and with moisture displacement by unheated air with heat recovery from the spent wet agent. The process of drying peat pellets in a drum using an intense ultra-high frequency (UHF) electromagnetic field with moisture displacement by unheated air is also considered. The main parameters of the convective drying process are assessed with the aim of selecting optimal conditions for its occurrence, allowing for a reduction in energy consumption for obtaining the final product. For the considered methods of drying peat pellets, analytical dependencies are presented for assessing the optimal parameters of the drying agent at equilibrium between the dried material and the drying medium.

Keywords: drum; moisture content; humidity; pressure; granule; temperature; heat capacity; heat content; enthalpy.

For citation. Kalantarov M. G., Sorokin A. I., Shilovich N. N., Yanuta Yu. G. Analysis of peat granules drying methods. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 156–171.

Введение. Процесс конвективной сушки неизбежно сопровождается неполным использованием энергии теплоносителя, что связано с условиями гигротермического равновесия между высушиваемым материалом и сушильной средой. Основной и общий недостаток существующих конструкций аэродинамических сушилок – сравнительно невысокая интенсивность тепло- и массообменных процессов. Практика показывает [1], что большинство сушилок являются достаточно энергоемкими, не обеспечивая нужного качества сушки. Утилизация и вторичное использование тепла отработанного сушильного агента до сих пор остаются проблематичными, так как существуют трудности, связанные со сравнительно невысоким потенциалом газового теплоносителя на выходе из сушилки. Анализ модельной задачи для каждого способа температурной сушки сыпучих материалов, на примере торфяных удобрений, позволяет обосновать целесообразность каждого способа сушки и определить оптимальный процесс сушки для создания наиболее экономичных конструкций сушильных установок. В имеющейся на настоящее время научно-технической литературе по сушке сыпучих материалов такая модельная задача не рассматривалась и выводы об экономической целесообразности использования рассмотренных в работе способов сушки не приведены. Обзор существующей научно-технической литературы

дает лишь практические рекомендации по улучшению отдельных технических характеристик сушильных установок с целью интенсификации процесса сушки различных материалов, но не позволяет сделать выводы об экономической эффективности использования таких сушильных установок, равно как и самих методов сушки.

В данной работе предполагалось рассмотреть модельные задачи необходимых затрат энергии для способов сушки на предмет их экономической целесообразности, таких как:

- 1) сушка в нагретом барабане с вытеснением влаги наружу непрогретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности);
- 2) сушка в барабане нагретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности) с выходом отработанного сушильного агента в атмосферу;
- 3) сушка в барабане интенсивным электромагнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ) с вытеснением влаги наружу ненагретым воздухом;
- 4) сушка методом нагрева инфракрасным излучением.

В процессе анализа полученных результатов ставилась цель: дать оценку соотношения энергетических затрат для указанных выше способов сушки в зависимости от режима выделения влаги из материала при изменении условий процесса сушки.

Методы исследования. При сушке нагретым воздухом с определенными параметрами нельзя удалить всю влагу из материала. Такой процесс может быть доведен только до равновесной, соответствующей данным термодинамическим параметрам воздуха влажности материала. В сушильной технике вводится понятие удаляемого влагосодержания W_y . Это влагосодержание материала W за вычетом его равновесного влагосодержания W_p : $W_y = W - W_p$.

Из изотерм десорбции следует, что если влагосодержание материала больше максимального гигроскопического $W_{г\text{ макс}}$, то давление пара жидкости материала p_m равно давлению насыщенного пара свободной жидкости при температуре материала p_n и не зависит от его влагосодержания, т. е. при $W > W_{г\text{ макс}}$: $p_m = p_n = \text{const}$. Сам процесс сушки рассматривается как квазистатический, т. е. средние значения влагосодержания и температуры внутри материала равны их локальным значениям, в том числе и их значениям на поверхности материала.

Известно, что водяной пар в воздухе может находиться либо в перегретом, либо в насыщенном состоянии. Смесь, состоящая из сухого воздуха и перегретого водяного пара, называется ненасыщенным влажным воздухом, или сушильным агентом. Такой сушильный агент поглощает влагу и используется в сушильных установках. Смесь, состоящая из сухого воздуха и насыщенного водяного пара, называется насыщенным влажным воздухом, и дальнейшее увеличение в нем влаги приведет к конденсации водяного пара и образованию жидкой фазы. Для большинства технических задач влажный воздух с хорошей точностью можно описать уравнением состояния идеального газа. При расчете сушильных установок основными параметрами влажного воздуха являются относительная влажность ϕ , влагосодержание X , температура T и энтальпия I .

Согласно первому закону термодинамики для процессов, в которых давление p постоянно бесконечно малое количество тепла dQ можно представить в виде полного дифференциала:

$$dQ = d(U + pV) = dI, \quad (1)$$

где $I = U + pV$ – тепловая функция системы, или энтальпия.

Под энтальпией понимается количество тепла, подведенное к влажному воздуху при постоянном давлении и нагревании его от 0°C до некоторой определенной температуры $T > 0^\circ\text{C}$. Энтальпия, подобно внутренней энергии U , определяется из термодинамических соотношений также с точностью до константы I_0 . Изменение энтальпии в процессах, происходящих при постоянном давлении, равно количеству тепла, полученному системой. Если система теплоизолирована, т. е. количества тепла в ней не изменяется: $dQ = 0$, то ее энтальпия при таком изобарно-адиабатическом процессе неизменна: $I = \text{const}$.

Энтальпия влажного воздуха состоит из энергии, используемой для нагревания сухого воздуха и воды, теплоты испарения воды и энергии, затраченной на нагревание водяного пара. Для расчета энтальпии влажного воздуха при начальных условиях $273,15\text{ K}$ (0°C) и давлении насыщенных паров $p_0 = 610\text{ Па}$ используют следующее выражение:

$$I = (C_b + C_n X)T + r_0 X = (1010 + 1970X)T + 2\,493\,000X, \quad (2)$$

где C_b и C_n – теплоемкости сухого воздуха и водяного пара соответственно; r_0 – удельная теплота парообразования при 0°C ; X – влагосодержание воздуха.

Влагосодержанием воздуха X является функцией только парциального давления и определяется выражением

$$X = 0,622P_n / (B - P_n) = 0,622\phi P_n / (B - \phi P_n). \tag{3}$$

При взаимодействии газа и влажного материала, содержащего свободную жидкость, процесс теплообмена сопровождается процессом переноса влаги, поэтому изобарно-адиабатические условия системы, выраженные уравнением (1), должны быть дополнены энтальпией переносимой массы влаги:

$$dQ = d(U + pV) - I_{ж} dW = dl - C_{ж} T_{ж} dX = 0. \tag{4}$$

Здесь $I_{ж} = C_{ж} T_{ж} = C_{ж} \Theta$ – удельная энтальпия жидкости; $dW = dX$ – удельное изменение массы влаги, т. е. изменение массы влаги на единицу сухой массы влажного газа.

После интегрирования выражения (4) в пределах некоторых состояний 1 и 2 получаем соотношение

$$(I_2 - I_1) / (X_2 - X_1) = \Delta I / \Delta X = C_{ж} \Theta. \tag{5}$$

Выражение (5) является уравнением прямой линии, которая характеризует изменение состояния влажного газа, контактирующего со свободной жидкостью влажного материала, в условиях изобарно-адиабатического процесса при конвективном подводе тепла.

Для действительного процесса уравнение (5) следует дополнить поступлениями или расходами тепла, имеющимися в реальной сушилке:

$$\Delta I / \Delta X = (C_{ж} \Theta + q_{дп}) - (q_m + q_{тр} + q_{пт}) = \Delta q, \tag{6}$$

где $q_{дп}$ – удельное добавочное тепло, вводимое в сушилку; q_m – удельные затраты тепла на нагрев материала до температуры адиабатического испарения влаги; $q_{тр}$ – тепло, затрачиваемое на нагревание транспортных средств или агентов; $q_{пт}$ – удельные потери тепла; Δq – сумма дополнительно сообщенного ($C_{ж}\Theta + q_{дп}$) и расходуемого ($q_m + q_{тр} + q_{пт}$) тепла.

В зависимости от соотношения количеств подводимого и расходуемого тепла процесс сушки может протекать с увеличением ($\Delta q > 0$) или уменьшением ($\Delta q < 0$) энтальпии сушильного агента; $\Delta q = 0$ характеризует процесс теоретической сушки (рис. 1). Соотношение (6) позволяет найти точку C' или C'' , показывающую отклонение реального процесса от теоретического процесса, т. е. от процесса при постоянной энтальпии (изоэнтальпии) (точка C).

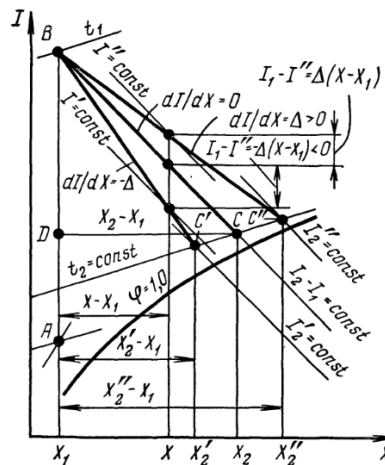


Рис 1. Расчет действительного процесса сушки на диаграмме I-X

Fig. 1. Calculation of the actual drying process on the diagram I-X

Общая схема процесса сушки в конвективной сушильной установке представлена на рис. 2. Наружный воздух с параметрами T_0 (температура), ϕ_0 (влажность), w_0 (влагосодержание) и l_0 (энтальпия) входит в сушильную камеру, в которой находится материал с параметрами T_0, ϕ_p, W_1 . В процессе сушки материала параметры воздуха изменяются и достигают значений T_1, ϕ_1, w_1 и l_1 . Состояние материала перед сушилкой характеризуется параметрами W_1 (начальное влагосодержание) и T_0 (начальная температура), а после сушилки параметрами W_2 (конечное влагосодержание) и T_1 (конечная температура).

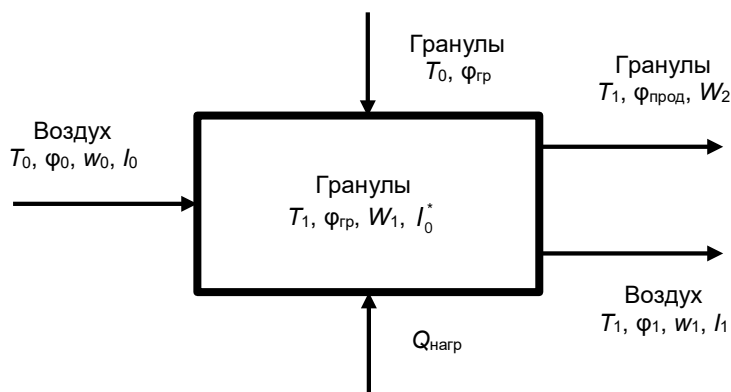


Рис. 2. Общая схема процесса сушки

Fig. 2. General diagram of the drying process

К числу основных потоков для уравнения материального баланса относят следующие: количество удаляемой в единицу времени влаги U и расход воздуха L . Согласно закону сохранения вещества масса влажного материала G_1 , входящего в сушильную камеру в единицу времени, равна массе высушенного материала G_2 , выходящего из камеры в единицу времени вместе с массой удаленной из него влаги U (материальный баланс по влажному материалу):

$$G_1 = G_2 + U. \quad (7)$$

Так как в процессе сушки масса сухого вещества остается постоянной, имеют место уравнения

$$G_1 = G_c / (1 - W_1 / 100) \text{ и } G_2 = G_c / (1 - W_2 / 100), \quad (8)$$

где G_c – масса сухого вещества; W_1 и W_2 – начальное и конечное влагосодержание соответственно, отнесенное к общей массе материала, %.

Уравнение баланса влаги для сушильной камеры при установившемся процессе сушки выражает равенство массы влаги, поступившей в камеру с материалом и воздухом, и влаги, уходящей из камеры с материалом и воздухом (материальный баланс по сушильному агенту):

$$G_1 W_1 / 100 + L w_0 / 1000 = G_2 W_2 / 100 + L w_1 / 1000, \quad (9)$$

где $G_1 W_1 / 100$ – масса влаги, поступившей с материалом в сушильную камеру; $L w_0 / 1000$ – масса влаги, поступившей с воздухом; $G_2 W_2 / 100$ – масса влаги, уходящей с материалом; $L w_1 / 1000$ – масса влаги, удаленной с воздухом; w – влагосодержание воздуха, выраженное в граммах на 1 кг сухого воздуха. Количество испаренной влаги $U = G_1 W_1 / 100 - G_2 W_2 / 100 = L(w_1 - w_0) / 1000$.

Следовательно, масса сухого воздуха $L = U \cdot 1000 / (w_1 - w_0)$.

Вместо величины w , имеющей размерность г/кг, также используют величину X , имеющую размерность кг/кг, т. е. $w = 1000X$. Тогда основное уравнение для определения расхода воздуха L в сушильной установке примет следующий вид:

$$L = U / (X_1 - X_0). \quad (10)$$

Расход тепла на сушку находят из теплового баланса для сушильного агента:

$$Q_{\text{нагр}} = L(I_1 - I_0) + Q_{G_2} - Q_{G_1}, \quad (11)$$

где $Q_{\text{нагр}}$ – теплота, подводимая непосредственно в сушильную камеру; I_0 и I_1 – энтальпии воздуха (сушильного агента) на входе и выходе сушильной камеры (барабана) соответственно, кДж/кг; Q_{G_2} – количество тепла, выходящее из камеры вместе с высушенным материалом требуемой влажности; Q_{G_1} – количество тепла, поступившее в камеру с влажным материалом гранул.

Основные тепловые потоки в сушильной камере (барабане):

– количество тепла, поступившее в сушильную камеру: Ll_0 – тепло, поступившее в камеру с воздухом из окружающей среды; $Q_{\text{нагр}}$ – дополнительное тепло, подводимое непосредственно в сушильную камеру; Q_{G_1} – количество тепла, поступившее в камеру с влажным материалом;

– количество тепла, выходящее из камеры: Ll_1 – количество тепла, выходящее из сушильной камеры с влажным воздухом; $G_2C(T_1 - T_0)$ – количество тепла, выходящее из сушильной камеры с высушенным материалом. Сюда же можно отнести: $Q_{\text{окр}}$ – потери тепла в окружающую среду; $Q_{\text{тр}}$ – транспортные потери тепла. Эти потери для модельной задачи составят не более 10 % от тепловых затрат на сушку материала в камере (барабане).

Здесь G_2 – масса высушенного материала влажности φ_2 , кг; $C = C_c(1 - \varphi_2) + C_{\text{ж}}\varphi_2$ – теплоемкость высушенного материала влажности φ_2 , Дж/(кг·К); C_c и $C_{\text{ж}}$ – теплоемкости сухого материала (торфяных) гранул и воды соответственно, Дж/(кг·К).

Результаты и их обсуждение.

1. Метод сушки в нагретом барабане с вытеснением влаги наружу ненагретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности) приведен на схеме сушки (рис. 3).

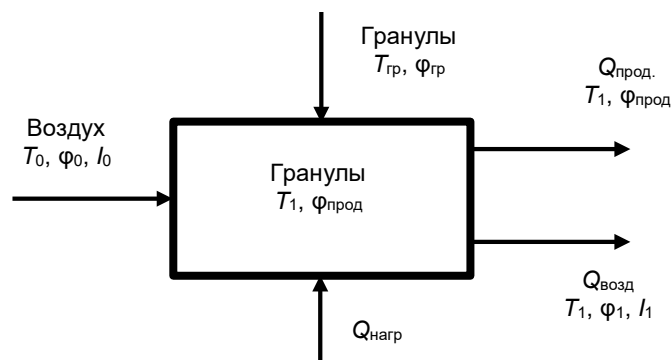


Рис. 3. Схема сушки в нагретом барабане с вытеснением влаги наружу ненагретым воздухом

Fig. 3. A drying scheme in a heated drum with moisture being forced out by unheated air

Граничные условия модельной задачи для процесса сушки представлены следующим образом:

Вход:

Исходный сушильный агент: $L, T_0, \varphi_0, w_0, l_0$.

Гранулы: $G_1, T_{\text{гр}} = T_0, \varphi_{\text{гр}} = 0,5, W_1 = G_c = 0,5$ кг.

Выход:

Отработанный агент: $L, T_1, \varphi_1, w_1, l_1$.

Гранулы: $G_2, T_{\text{прод}} = T_1, \varphi_{\text{прод}} = 0,1, W_2 = G_c / 9$.

Требуется найти общий расход тепла $Q_{\text{общ}}$, а также расход тепла, затраченный на нагрев $Q_{\text{нагр}}$: воздуха $Q_{\text{возд}}$ и продукта $Q_{\text{прод}}$.

Уравнение теплового баланса для сушильной камеры:

$$Q_{\text{нагр}} = L(l_1 - l_0) + G_2(C_c(1 - \varphi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}}\varphi_{\text{прод}})(T_1 - T_0), \quad (12)$$

где L – массовый расход сушильного агента (сухого воздуха), кг; l_0 и l_1 – энтальпии исходного и отработанного агента (воздуха) соответственно, кДж/кг; G_1 – масса влажного материала, поступившего в сушильную камеру, кг; G_2 – масса высушенного материала, выходящего из камеры, кг; G_c – масса сухого вещества гранулы, кг; C_c и $C_{\text{ж}}$ – теплоемкости сухого торфа и воды соответственно, Дж/(кг·К); $\varphi_{\text{гр}}$ – начальная влажность материала гранулы, т. е. влагосодержание гранулы, отнесенное к общей массе материала гранулы и выраженное в долях; $\varphi_{\text{прод}}$ – конечная влажность материала гранулы, выраженная в долях. Здесь, соответственно:

$$Q_{\text{возд}} = L(l_1 - l_0) \text{ и } Q_{\text{прод}} = G_2(C_c(1 - \varphi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}}\varphi_{\text{прод}})(T_1 - T_0). \quad (13)$$

Сушка при заданном количестве сушильного агента в сушильной камере (барабане) продолжается до тех пор, пока давление водяного пара в материале будет превышать парциальное давление водяного пара в сушильном агенте, т. е. $p_{\text{п}} < p_{\text{м}}$ или $p_{\text{п}}/p_{\text{н}} < p_{\text{м}}/p_{\text{н}}$ (где $p_{\text{п}}$ и $p_{\text{н}}$ – парциальное давление водяного пара и давление насыщенного пара для сушильного агента; $p_{\text{м}}$ – давление водяного пара в материале).

Процесс сушки протекает пока $\varphi_{\text{агента}} = \varphi_0 < \varphi_{\text{материала}}$.

Количество тепла, затрачиваемое на процесс сушки в нагретом барабане при вытеснении влаги наружу непрогретым воздухом, поступающим в барабан из окружающей среды,

$$Q_{\text{нагр}} = 8/9 \cdot G_c (l_1 - l_0) / (X_1 - X_0) + G_2 (C_c (1 - \varphi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}} \varphi_{\text{прод}}) (T_1 - T_0). \quad (14)$$

Для сушильного агента, поступающего в камеру при $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (293 K) с присутствующим в нем водяным паром, работа в ходе его расширения, затраченная на вытеснение отработанного агента из барабана, равна: $A = P_{\text{атм}} \Delta V = P_{\text{атм}} (V_1 - V_0)$, где $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, равное 101 325 Па, а V_1 и V_0 – объемы, занимаемые сушильным агентом при температуре нагрева T_1 и температуре окружающей среды (начальной температуре) $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (293 K) соответственно.

Масса сушильного агента не изменяется при его изобарическом расширении. Тогда

$$A = P_{\text{атм}} \Delta V = P_{\text{атм}} V_0 (T_1 / T_0 - 1). \quad (15)$$

Количество тепла, расходуемое на механическую работу расширения атмосферного воздуха при вытеснении отработанного влажного агента из барабана, составит:

$$Q_{\text{расш}} = P_{\text{атм}} \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) V_0 = P_{\text{атм}} \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) \mu V_{\text{моль}}, \quad (16)$$

где $\mu = L_{\text{возд}} / M_{\text{атм}}$ – количество молей атмосферного воздуха при известном его расходе $L_{\text{возд}}$ на сушку 1 кг материала ($M_{\text{атм}}$ – молярная масса атмосферного воздуха при $\varphi_0 = 0,4$).

Общие затраты тепла для метода сушки в нагретом барабане с вытеснением влаги наружу ненагретым воздухом на сушку 1 кг материала по схеме на рис. 3 представлены в табл. 1.

2. Метод сушки в барабане нагретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности) с выходом отработанного агента в атмосферу приведен на схеме сушки (рис. 4).

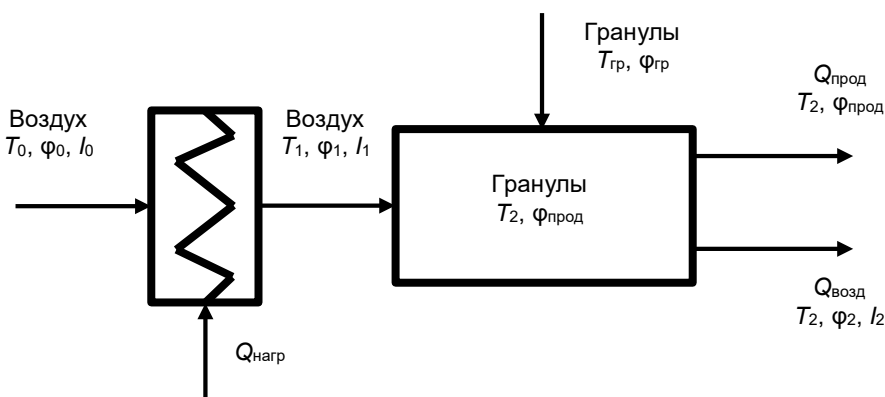


Рис. 4. Схема сушки в барабане нагретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности) с выходом отработанного сушильного агента в атмосферу

Fig. 4. A drying scheme in a drum with heated air (drying agent of a given humidity) with the release of spent drying agent into the atmosphere

Граничные условия модельной задачи для процесса сушки представлены следующим образом:

Вход:

Исходный сушильный агент: $L, T_0, \varphi_0, w_0, l_0$.

Гранулы: $G_1, T_{\text{гр}} = T_0, \varphi_{\text{гр}} = 0,5, W_1 = G_c = 0,5 \text{ кг}$.

Выход:

Отработанный агент: $L, T_2, \varphi_2, w_2, l_2$.

Гранулы: $G_2, T_{\text{прод}} = T_2, \varphi_{\text{прод}} = 0,1, W_2 = G_c / 9$.

Требуется найти общий расход тепла $Q_{\text{общ}}$, а также расход тепла, затраченный на нагрев $Q_{\text{нагр}}$: воздуха $Q_{\text{возд}}$ и продукта $Q_{\text{прод}}$.

Система уравнений теплового баланса:

– для нагревателя:

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{возд}} + Q_{\text{расш}} = L(l_1 - l_0) + P_{\text{атм}} \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) \mu V_{\text{моль}}; \quad (17)$$

– для сушильной камеры:

$$L(I_1 - I_2) = G_2 (C_c(1 - \varphi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}} \varphi_{\text{прод}}) (T_2 - T_0), \quad (18)$$

где L – массовый расход сушильного агента (сухого воздуха), кг; I_0 , I_1 и I_2 – энтальпии исходного, нагретого и отработанного агента (воздуха) соответственно, кДж/кг; G_1 – масса влажного материала, поступившего в сушильную камеру, кг; G_2 – масса высушенного материала, выходящего из камеры, кг; G_c – масса сухого вещества гранулы, кг; C_c и $C_{\text{ж}}$ – теплоемкости сухого торфа и воды соответственно, Дж/(кг·К); $\varphi_{\text{гр}}$ – начальная влажность материала гранулы, т. е. влагосодержание гранулы, отнесенное к общей массе материала гранулы и выраженное в долях; $\varphi_{\text{прод}}$ – конечная влажность материала гранулы, выраженная в долях. Здесь, соответственно:

$Q_{\text{возд}} = L(I_1 - I_0)$ – количество тепла, затраченное только на нагрев воздуха;

$Q_{\text{расш}} = P_{\text{атм}} \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) \mu V_{\text{моль}}$ – количество тепла, затраченное на механическую работу расширения

атмосферного воздуха в результате его нагрева (μ – количество молей атмосферного воздуха при известном его расходе на сушку 1 кг материала). К общим затратам энергии добавляются также транс-

портные расходы на движение воздуха со скоростью V : $\frac{L_{\text{возд}} V^2}{2}$.

Следует обратить внимание на следующую особенность процесса сушки данным методом. В модельной задаче сушильная камера рассматривается как теплоизолированный от внешней среды некоторый объем пространства. В процессе сушки внутри этого объема происходит теплообмен сушильного агента с высушиваемым материалом. Внутренняя энергия системы сушильный агент – высушиваемый материал не меняется. В результате удаления влаги из материала определенное количество тепла сушильного агента уходит на испарение воды, т. е. на переход воды из жидкого в парообразное состояние. При этом энтальпия сушильного агента уменьшается на величину парообразования. Образовавшийся при этом пар переходит в сушильный агент, повышая его влажность и, соответственно, его энтальпию. В итоге при удалении влаги из материала методом обдувания нагретым воздухом температура системы сушильный агент – высушиваемый материал несколько уменьшается до некоторого значения T_2 в отличие от метода сушки в барабане, нагретом до заданной постоянной температуры $T_1 > T_2$.

Таким образом, даже в случае идеального контакта сушильного агента с материалом процесс удаления влаги из материала сопровождается понижением температуры сушки до некоторого значения T_2 . Соответственно, даже при идеальном теплообмене сушильного агента и материала, т. е. когда тепло передается материалу от всего объема сушильного агента, поступившего в камеру, а не только от небольшой его части в непосредственной близости от высушиваемого материала, количество влаги, удаленное из материала, будет соответствовать количеству влаги, удаленной из материала по методу сушки в барабане, нагретом до температуры $T_2 < T_1$. Это, в свою очередь, потребует увеличения расхода сушильного агента и, соответственно, не только транспортных затрат, но и затрат тепла на его нагрев.

Следует также отметить, что количество влаги, удаляемой из материала, обратно пропорционально температуре сушки методом обдува материала нагретым воздухом и по своей сути дальнейшее удаление влаги из материала ограничено величиной этой удаляемой влаги за счет дополнительного повышения влажности сушильного агента в результате понижения его температуры.

Единственный выход повышения эффективности данного способа сушки – повысить температуру нагрева поступающего в барабан сушильного агента. Однако повышение температуры сушильного агента ограничено величиной термической устойчивости высушиваемого материала.

Таким образом, даже без учета повышения транспортных расходов, затраченных на движение воздуха со скоростью V , и при идеальном теплообмене сушильного агента и высушиваемого материала, количество тепла, требуемое только на нагрев сушильного агента нагретым воздухом, превышает количество тепла, требуемое при сушке в нагретом до постоянной температуры барабане.

В случае увеличения скорости поступления сушильного агента в камеру лишь некоторая его часть будет задействована в теплообмене с высушиваемым материалом. Соответственно, чем больше скорость движения нагретого воздуха в камере, тем больше его массовый расход и, значит, тем меньшая его часть от всего поступившего в камеру объема нагретого воздуха будет участвовать в теплообмене с высушиваемым материалом.

Таким образом, для характеристики процесса теплообмена сушильного агента и материала логично ввести параметр $\varepsilon \leq 1$, характеризующий некоторую часть от всего объема сушильного агента в барабане, которая успеет вступить в теплообмен с высушиваемым материалом.

Параметр ϵ обратно пропорционален скорости движения нагретого воздуха в барабане (камере) и измеряет скорость его движения V , при сушке нагретым воздухом в барабане, в скоростях его вытеснения $V_{\text{выт}}$, при сушке в нагретом барабане, вытесняя отработанный агент, нагретый в барабане до температуры T , ненагретым воздухом, поступающим в барабан со скоростью вытеснения $V_{\text{выт}}$, т. е. справедливо соотношение $\epsilon = V_{\text{выт}} / V$. Если при сушке материала нагретым воздухом скорость движения воздуха в барабане равна скорости его вытеснения при сушке в нагретом барабане, то $\epsilon = 1$ и тогда процесс сушки материала нагретым воздухом происходит при идеальном теплообмене сушильного агента и материала, т. е. когда тепло передается материалу от всего объема сушильного агента поступившего в камеру, а не только от небольшой его части в непосредственной близости от высушиваемого материала. Как было указано выше, даже при таком идеальном режиме процесс удаления влаги из материала сопровождается понижением температуры сушки до некоторого значения T_2 . Это понижение температуры уменьшает способность сушильного агента отбирать влагу из материала и, в свою очередь, требует увеличения его расхода на сушку, что ведет к увеличению, не только транспортных затрат на его перемещение со скоростью V , но и затрат тепла, на его нагрев. Соответственно, увеличение скорости движения нагретого воздуха в барабане ведет к уменьшению времени его взаимодействия с высушиваемым материалом, а, значит, к уменьшению относительного объема сушильного агента, который вступил в теплообмен с высушиваемым материалом, т. е. к уменьшению параметра ϵ . Это еще более понижает температуру той части сушильного агента в камере, которая вступила в теплообмен с высушиваемым материалом, что означает понижение фактической температуры сушки нагретым воздухом в барабане, поскольку уменьшает способность сушильного агента отбирать влагу из материала и, в свою очередь, требует увеличения его расхода на сушку. Количество тепла, требуемое на удаление влаги из 1 кг материала гранул нагретым воздухом, поступающим в барабан из нагревателя, определяется из уравнения:

$$Q_{\text{нагр}} = 8/9 \cdot G_c (I_2 - I_0) / (X_2 - X_0) + G_2 (C_c (1 - \phi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}} \phi_{\text{прод}}) (T_2 - T_0). \quad (19)$$

Необходимый расход сушильного агента на сушку 1 кг материала составит $8/9 \cdot G_c (X_2 - X_0)$ кг, и, соответственно, расход тепла на его нагрев по схеме сушки на рис. 4 равен:

$$Q_{\text{нагр}} = 8/9 \cdot G_c (I_1 - I_0) / (X_2 - X_0) + G_2 (C_c (1 - \phi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}} \phi_{\text{прод}}) (T_2 - T_0). \quad (20)$$

Общие затраты тепла для метода сушки в барабане нагретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности) с выходом отработанного агента в атмосферу на сушку 1 кг материала по схеме на рис. 4 представлены в табл. 1 для следующих скоростей V движения воздуха в барабане: $V = V_{\text{выт}}$, $V = 10V_{\text{выт}}$, $V = 15V_{\text{выт}}$, $V = 20V_{\text{выт}}$, где $V_{\text{выт}} \approx 0,05-0,15$ м/с.

Таблица 1. Результаты общих тепловых затрат на сушку 1 кг материала по схеме на рис. 3 для скорости $V = V_{\text{выт}}$ и на рис. 4 для скоростей $V = V_{\text{выт}}$, $V = 10V_{\text{выт}}$, $V = 15V_{\text{выт}}$, $V = 20V_{\text{выт}}$

Table 1. Results of total heat consumption for drying 1 kg of material on the scheme in fig. 3 for the speed $V = V_{\text{displ}}$ and in fig. 4 for the speeds $V = V_{\text{displ}}$, $V = 10V_{\text{displ}}$, $V = 15V_{\text{displ}}$, $V = 20V_{\text{displ}}$

$T, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{общ}}, \text{Дж (рис. 3)}$ $V = V_{\text{выт}}$	$Q_{\text{общ}}, \text{Дж (рис. 4)}$			
		$V = V_{\text{выт}}$	$V = 10V_{\text{выт}}$	$V = 15V_{\text{выт}}$	$V = 20V_{\text{выт}}$
50	11 002 274	11 735 920	117 030 389	183 197 502	234 030 959
60	4 961 662	5 156 006	51 121 907	81 767 132	102 197 769
70	3 456 330	3 601 149	35 466 055	56 709 968	72 838 390
80	2 743 279	2 888 908	28 237 476	46 489 284	60 633 828
90	2 325 430	2 491 004	25 357 140	41 002 979	54 057 310
100	2 055 119	2 255 053	23 851 016	40 234 528	53 384 624
110	1 870 721	2 121 576	23 624 294	40 406 828	54 512 909
120	1 740 994	2 060 989	24 688 646	42 876 201	58 426 477
130	1 648 048	2 063 605	26 435 047	46 583 302	66 922 686
140	1 580 789	2 135 485	30 093 711	56 060 574	80 031 454
150	1 531 957	2 300 904	36 735 156	69 024 503	101 316 120

Представление об общих затратах, согласно значениям, приведенным в табл. 1, наглядно иллюстрирует рис. 5. На нем величина ϵ характеризует скорость V движения воздуха в барабане, т. е. показывает приведенный объем сушильного агента в камере, который был использован на испарение количества влаги из материала за время, в течение которого сушильный агент двигался в барабане со скоростью V .

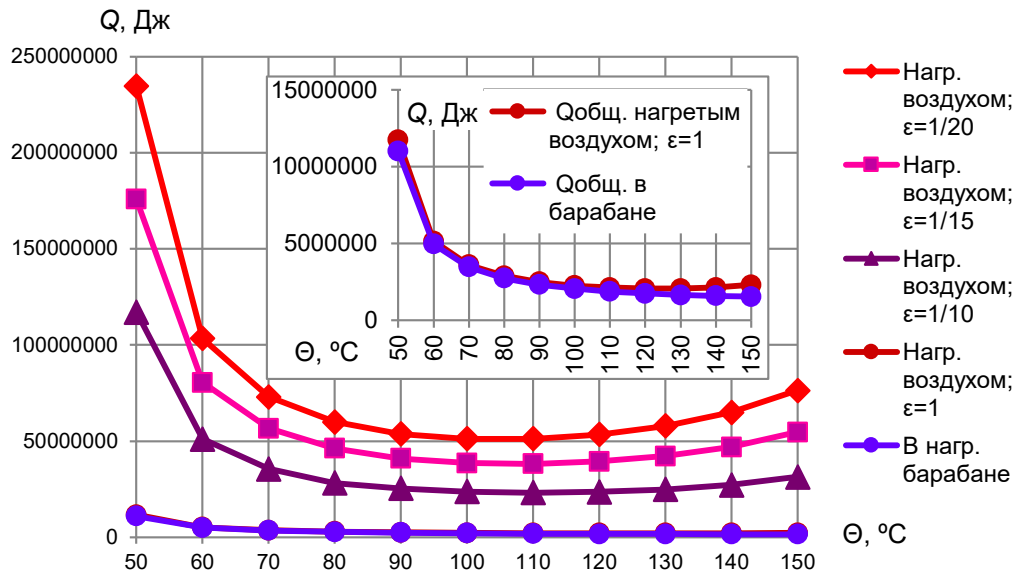


Рис. 5. Общие затраты тепла для метода сушки 1 кг материала в барабане нагретым воздухом с выходом последнего в атмосферу для скоростей V движения воздуха в барабане: $V = V_{\text{выт}}, V = 10V_{\text{выт}}, V = 15V_{\text{выт}}, V = 20V_{\text{выт}}$, где $V_{\text{выт}} \approx 0,1$ м/с

Fig. 5. Total heat consumption for the method of drying 1 kg of material in a drum with heated air with the release of the latter into the atmosphere for air movement speeds of V in the drum: $V = V_{\text{displ}}, V = 10V_{\text{displ}}, V = 15V_{\text{displ}}, V = 20V_{\text{displ}}$, where $V_{\text{displ}} \approx 0,1$ m/c

На рис. 6 представлен график отношений тепловых затрат на нагрев сушильного агента в методе сушки нагретым воздухом Q_2 и сушке в нагретом барабане Q_1 . Величина ϵ характеризует приведенный размер активной части объема сушильного агента поступившего в камеру, т. е. относительный размер той части объема сушильного агента в камере, которая участвует в теплообмене с высушиваемым материалом.

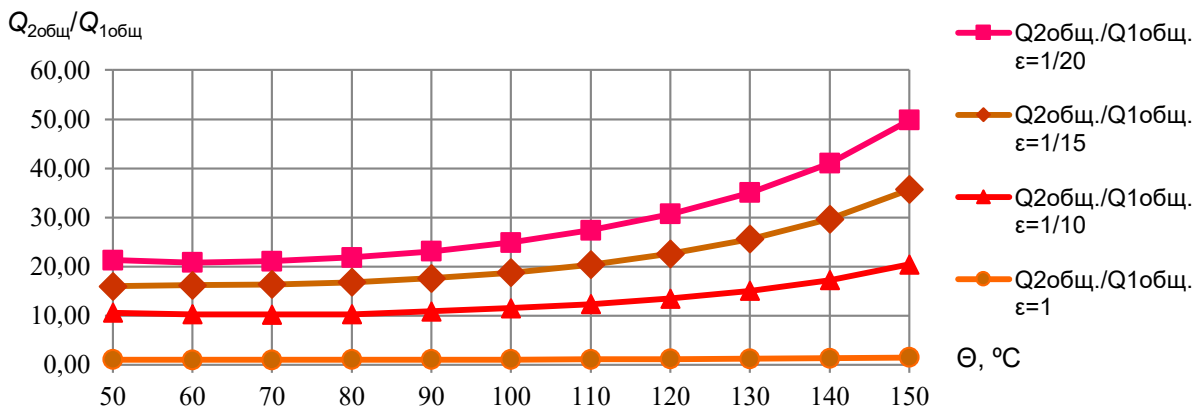


Рис. 6. Отношение тепловых затрат $Q_{2_{\text{общ}}} / Q_{1_{\text{общ}}}$ на нагрев сушильного агента в методе сушки нагретым воздухом и сушке в нагретом барабане

Fig. 6. The ratio of heat costs $Q_{2_{\text{total}}} / Q_{1_{\text{total}}}$ for heating the drying agent in the method of drying with heated air and drying in a heated drum

3. Метод сушки в поле СВЧ в период постоянной скорости приведен на схеме сушки (рис. 7).

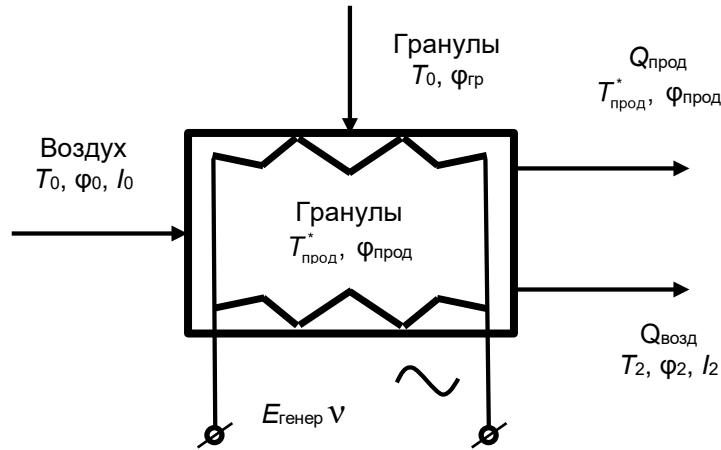


Рис. 7. Схема сушки в барабане интенсивным электромагнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ) с вытеснением влаги наружу непрогретым воздухом

Fig. 7. A drying scheme in a drum using an intense electromagnetic field of ultra-high frequency (UHF) with the displacement of moisture to the outside by unheated air

Граничные условия модельной задачи для процесса сушки представлены следующим образом:

Вход:
Исходный агент (воздух): $L_m, T_0, \varphi_0, w_0, l_0$;
Гранулы: $G_1, T_{гр} = T_0, \varphi_{гр} = 0,5, W_1 = G_c$.

Выход:
Отработанный агент: $L_{2m}, T_2, \varphi_2, w_2, l_2$;
Гранулы: $G_2, T_{прод} = T_2, \varphi_{прод} = 0,1, W_2 = G_c / 9$.

Определить $N_{генер.}, A_{генер.}, Q_{затр.}, Q_{прод.}$

Отличительной особенностью нагрева в поле СВЧ от других способов подвода тепла является быстрый прогрев материала до температуры $T = 60\text{ }^\circ\text{C}$ (333 K) и более замедленное повышение до температуры $T = 90\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$ (463–473 K). Релаксация градиента давления в материалах с высокой пористостью происходит мгновенно [5].

В ходе проведения экспериментов была построена зависимость времени сушки t от мощности N_r генератора СВЧ в интервале от 300 до 850 Вт при разном влагосодержании φ .

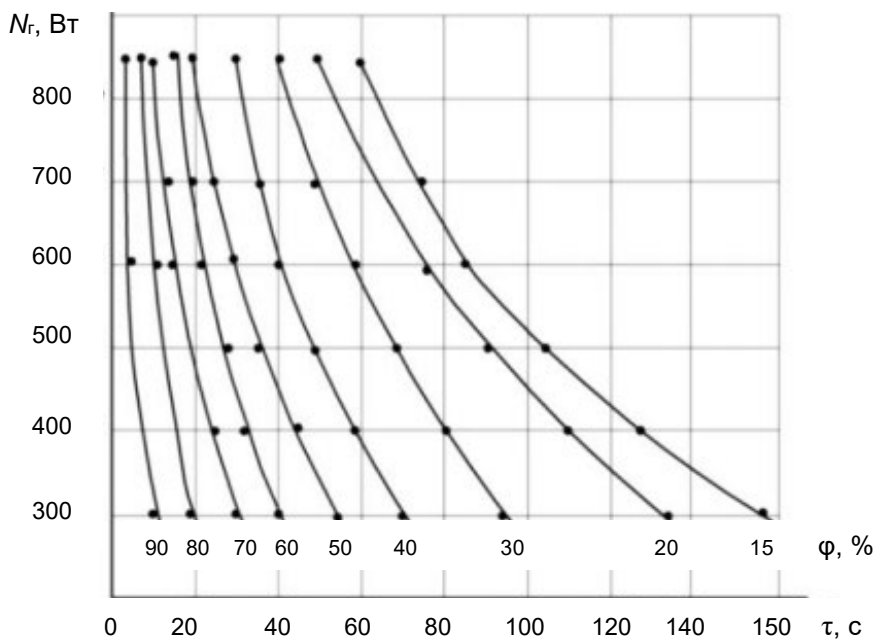


Рис. 8. Зависимость времени сушки τ от мощности генератора СВЧ для различных значений φ

Fig. 8. Dependence of drying time τ on the microwave generator power for different values of φ

Представленные на рис. 8 зависимости описаны уравнением

$$\tau = 1,5 \frac{Q}{N_r} e^{-0,028\varphi}. \quad (21)$$

Уравнение (21) позволяет рассчитать время сушки τ влажного материала от начального влаго содержания φ_0 до заданного текущего или до равновесного $\varphi_p = 0,1$ (10 %) в диапазоне изменения мощности генератора СВЧ от 300 до 850 Вт. Здесь Q – общие затраты энергии на достижение равновесного φ_p . Количество тепла, выделяемое в единице объема материала ($\text{Вт}/\text{м}^3$), определяется по полуэмпирической формуле:

$$Q_v = 5,55 \varepsilon_m \operatorname{tg}(\delta) \nu E^2 \cdot 10^{-11}, \quad (22)$$

где ε_m – диэлектрическая постоянная нагреваемого материала (для тканей $\varepsilon_m = 2$); $\operatorname{tg}(\delta)$ – тангенс угла диэлектрических потерь; ν – частота электрического поля, Гц; E – напряженность внешнего электрического поля, В/м.

При расчете источника тепла Q_v тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}(\delta)$ при обезвоживании материала уменьшается во всем диапазоне частот и существенно зависит от влагосодержания. Для материала с влажностью $\varphi \approx 8\text{--}12\%$ тангенс угла $\operatorname{tg}(\delta)$ лежит в пределах 0,02–0,06, а при влажности 30–100 % определяется как тангенс угла диэлектрических потерь по воде, содержащейся в тканях, и изменяется от 0,10–0,13 до 1,40 при влажности ткани $\varphi \approx 80\text{--}100\%$.

При изменении мощности генератора СВЧ от 300 до 850 Вт напряженность электрического поля E регулировали в диапазоне $E = (200\text{--}400) \cdot 10^2$ В/м.

Значения Q_v для тканей при средней влажности $\varphi \approx 30\text{--}60\%$ вычисляли при значениях $\varepsilon_m = 2$ для волокнистого материала и среднего значения тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}(\delta) \approx 0,10\text{--}0,13$. Значения мощности генератора СВЧ и напряженности электрического поля E принимали, соответственно, равными: $N_1 = 300$ Вт и $E_1 = 20\,000$ В/м; $N_2 = 600$ Вт и $E_2 = 28\,500$ В/м; $N_3 = 850$ Вт и $E_3 = 38\,500$ В/м.

Кинетика процесса сушки токами сверхвысокой частоты в принципе не отличается от других способов сушки. Отличие заключается в очень быстром прогреве материала до температур, близких к $T = 100$ °С. Интенсивность переноса влаги внутри материала при сверхвысокочастотном нагреве характеризуется величиной критерия Померанцева $Po = \frac{Q_v R_v^2}{\lambda_{вл} T_m}$, где Q_v – источник тепла, R_v – характерный размер гранул, м; $\lambda_{вл}$ – теплопроводность влажной гранулы, Вт/(м·°С); T – абсолютная температура влажной гранулы, К.

Тепло, подводимое к материалу, определяли по основному уравнению кинетики сушки:

$$r \frac{du}{d\tau} R_v \rho_0 (1 + K_C Rb) = Q_v R_v + q_k(\tau), \quad (23)$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг; $du/d\tau$ – скорость сушки, с^{-1} (u – среднее интегральное влагосодержание, %; τ – время сушки, с); ρ_0 – плотность сухого материала (гранулы), $\text{кг}/\text{м}^3$; $q_k(\tau)$ – мощность конвективного источника тепла;

K_C – критерий, учитывающий изменение теплоемкости влажного материала: $K_C = (c_{сух} + c_{ж}) / c_{ж}$, где $c_{сух}$, $c_{ж}$ – теплоемкости сухого тела и воды соответственно, Дж/(кг·°С);

Rb – критерий Ребиндера, взятый по отношению к сухому материалу: $Rb = (c_{сух} b) / r$, где $b = dt / du$ – температурный коэффициент сушки, характеризующий испарение влаги из материала за малый промежуток времени.

Мощность теплового потока, подводимого к материалу

$$q = Q_v R_v F_u, \quad (24)$$

где F_u – поверхность испарения материала, м^2 .

Результаты расчета значений Q_v , критерия Померанцева Po и мощности тепловых потоков от напряженности электрического поля представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета основных энергетических параметров в поле СВЧ

Table 2. Results of calculation of the main energy parameters in the UHF field

$E, \text{ В/м}$	$Q_V \cdot 10^{-6}, \text{ Вт/м}^3$	$q, \text{ Вт}$	P_o	$N_r, \text{ Вт}$
20 000	14,2	285	0,42	300
28 500	29,3	580	0,85	600
38 500	45,1	840	1,32	850

Мощность генератора СВЧ при сушке влажного материала определяли по экспериментальной зависимости [6]:

$$N_r = \frac{1,16(q_n + q_{и} + q_p)}{\eta_r \eta_k}, \tag{25}$$

где q_n – теплота, затраченная на нагрев влажного материала, Вт; $q_{и}$ – теплота, затраченная на испарение влаги из материала, Вт; q_p – потери тепла в окружающую среду, Вт; η_r – КПД генератора, равный 0,65; η_k – КПД контура, равный 0,5.

Потери тепла в окружающую среду в процессе сушки: $q_p = 0,05(q_n + q_{и})$.

Теплота на испарение влаги, Вт:

$$q_{и} = \frac{rjF_m}{3600}, \tag{26}$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг; j – интенсивность испарения влаги, кг/(м²·ч); F_m – поверхность испарения материала, м².

Теплота на нагрев материала

$$q_n = \frac{G_c C_c (T_2 - T_m)}{\tau}, \tag{27}$$

где G_c – сухой вес торфа, кг; C_c – теплоемкость сухого торфа, кг/Дж; T_m – температура материала в момент начала фазового перехода воды в пар.

Теплота, затраченная на прогрев исходного материала гранул до начала испарения влаги, Вт:

$$Q_{\text{прогр}} = G_1 (C_c (1 - \varphi_{гр}) + C_{ж} \varphi_{гр}) (T_m - T_0), \tag{28}$$

где G_1 – вес влажного материала, кг; C_c и $C_{ж}$ – теплоемкости сухого торфа и воды соответственно, кг/Дж; τ – время прогрева влажного материала до начала потери им влаги, с.

В табл. 3 представлены затраты времени на сушку до заданной влажности капиллярно-пористого материала в поле сверхвысокой частоты (СВЧ) в зависимости от мощности излучателя, полученные как в эксперименте, так и путем расчета из уравнения (21).

Таблица 3. Сравнение значений времени τ с экспериментом и расчетом на основе уравнения (21)

Table 3. Comparison of time values τ with experiment and calculation based on equation (21)

$\varphi, \%$		10	15	20	30	40	50
$N_r = 300 \text{ Вт}$	$\tau_{\text{экс}}, \text{ с}$	183,55	160	135	98	76	56
	$\tau_{\text{расч}}, \text{ с}$	180,19	158	133,5	100	76,4	57,7
$N_r = 600 \text{ Вт}$	$\tau_{\text{экс}}, \text{ с}$	95,58	82	72	55	41	30
	$\tau_{\text{расч}}, \text{ с}$	90,13	78	68	51	39	29
$N_r = 850 \text{ Вт}$	$\tau_{\text{экс}}, \text{ с}$	69,93	59	50	39	29	20
	$\tau_{\text{расч}}, \text{ с}$	64,54	56	48,5	36	27,5	20,7

На основе этих данных получена зависимость (21) времени сушки τ от мощности N_r генератора СВЧ в интервале от 300 до 850 Вт. Значения результатов расчета и экспериментальных данных на графиках определяли для образца с массой сухого материала 0,1 кг.

Общее уравнение теплового баланса для сушильной камеры

$$Q_{\text{затр}} = Q_{\text{прогр}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}} + 0,05(Q_{\text{прогр}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}}) = 1,05(Q_{\text{прогр}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}}), \quad (29)$$

где $Q_{\text{н}}$ – теплота на нагрев материала: $Q_{\text{н}} = G_c C_c (T_2 - T_m)$; $Q_{\text{и}}$ – теплота на испарение влаги: $Q_{\text{и}} = rjF_m = rU$, где U – масса водяного пара в расчете на 1 кг исходного материала.

Соответственно, затраты энергии на работу генератора определяли уравнением

$$A_{\text{генер}} = Q_{\text{затр}} / (\eta_r \eta_k) = 1,05(Q_{\text{прогр}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}}) / (\eta_r \eta_k), \quad (30)$$

Так, в частности, на сушку 1 кг торфяных гранул с начальной влажностью $\varphi_{\text{гр}} = 0,5$ до влажности $\varphi_{\text{прод}} = 0,1$ для генератора СВЧ потребуется приблизительно 4,7 МДж энергии, что равноценно потреблению электроэнергии 1,3 кВт·ч.

Более подробно общие затраты тепла на сушку 1 кг материала для рассмотренных методов сушки: по схеме на рис. 3 – в нагретом барабане до заданной температуры, по схеме на рис. 4 – нагретым воздухом в теплоизолированном барабане для скоростей движения воздуха V , равных $V_{\text{выт}}$, $10V_{\text{выт}}$, $15V_{\text{выт}}$, $20V_{\text{выт}}$, где $V_{\text{выт}} \approx 0,05\text{--}0,15$ м/с, а также по схеме на рис. 7 – методом СВЧ приведены в сводной табл. 4 для диапазона температур от 95 °С до 105 °С соответственно.

Таблица 4. Результаты общих тепловых затрат на сушку 1 кг материала по схеме на рис. 3 для скорости $V = V_{\text{выт}}$, на рис. 4 для скоростей $V = V_{\text{выт}}$, $V = 10V_{\text{выт}}$, $V = 15V_{\text{выт}}$, $V = 20V_{\text{выт}}$ и на рис. 7 в диапазоне температур от 95 °С до 105 °С

Table 4. Results of total heat consumption for drying 1 kg of material on the scheme in fig. 3 for the speed $V = V_{\text{displ}}$ and in fig. 4 for the speeds $V = V_{\text{displ}}$, $V = 10V_{\text{displ}}$, $V = 15V_{\text{displ}}$, $V = 20V_{\text{displ}}$ and in fig. 7 in the temperature range from 95 °C to 105 °C

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_{\text{общ.}}, \text{ Дж (рис. 3)}$ $V = V_{\text{выт}}$	$Q_{\text{общ.}}, \text{ Дж (рис. 4)}$				$Q_{\text{общ.}}, \text{ Дж (рис. 7)}$ СВЧ
		$V = V_{\text{выт}}$	$V = 10V_{\text{выт}}$	$V = 15V_{\text{выт}}$	$V = 20V_{\text{выт}}$	
95	2 176 730	2 366 132	24 485 066	39 518 437	52 114 731	4 932 796
96	2 150 464	2 325 022	24 315 227	39 297 543	51 881 599	4 9484 20
97	2 125 219	2 315 843	24 158 543	39 098 111	51 676 759	4 964 043
98	2 100 945	2 295 633	24 014 906	38 919 854	51 499 292	4 979 667
99	2 077 593	2 274 670	23 883 600	38 761 635	51 348 325	4 995 291
100	2 055 119	2 255 053	23 764 372	38 623 060	51 223 181	5 010 914
101	2 033 483	2 239 743	23 656 921	38 503 412	51 123 025	5 026 538
102	2 012 645	2 222 315	23 560 780	38 402 307	51 047 223	5 042 162
103	1 992 568	2 207 094	23 475 745	38 319 272	50 995 262	5 057 786
104	1 973 220	2 190 854	23 401 405	38 253 848	50 966 595	5 073 409
105	1 954 566	2 178 239	23 337 656	38 205 603	50 960 749	5 089 033

Наглядное представление об общих затратах, приведенных в табл. 4 для указанного диапазона температур, дает рис. 9.

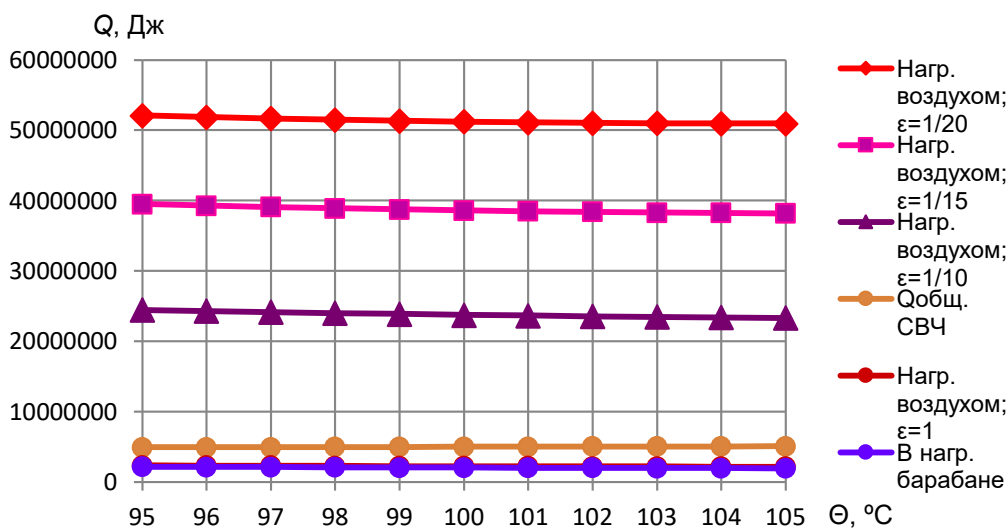


Рис. 9. Общие затраты тепла для метода сушки 1 кг материала в нагретом барабане, нагретым воздухом и СВЧ по схеме на рис. 3 для скорости $V = V_{\text{выт}}$, на рис. 4 для скоростей $V = V_{\text{выт}}$, $V = 10V_{\text{выт}}$, $V = 15V_{\text{выт}}$, $V = 20V_{\text{выт}}$ и на рис. 7 в диапазоне температур от 95 °С до 105 °С

Fig. 9. Total heat consumption for the method of drying 1 kg of material in a heated drum, heated air and microwave on the scheme in fig. 3 for the speed $V = V_{\text{displ}}$ and in fig. 4 for the speeds $V = V_{\text{displ}}$, $V = 10V_{\text{displ}}$, $V = 15V_{\text{displ}}$, $V = 20V_{\text{displ}}$ and in fig. 7 in the temperature range from 95 °C to 105 °C

Заключение. Анализ сушки сыпучего материала (торфяных гранул) рассмотренными выше методами 1, 2, и 3 показал, что самым экономичным способом сушки с точки зрения затрат тепла в рамках проведенного анализа является способ сушки по схеме 1, т. е. сушка в нагретом до постоянной температуры барабане с вытеснением влаги наружу атмосферным воздухом. Данный способ сушки удобен тем, что для него не требуется дополнительного энергопотребляющего оборудования. В этой схеме сушки лишь незначительно увеличиваются транспортные расходы для подачи атмосферного воздуха.

Сушка при низкой температуре, т. е. менее 60 °С для любой из схем 1 и 2 становится энергозатратной ввиду резкого увеличения расхода сушильного агента (атмосферного воздуха). Даже без учета увеличения транспортных потерь значительное количество тепловой энергии затрачивается на работу расширения сушильного агента при его нагревании в процессе вытеснения влажного воздуха из сушильной камеры (барабана). Как показывают расчетные зависимости, чем выше температура в сушильной камере (барабане), тем меньше расход сушильного агента и, следовательно, меньше тепловой энергии тратится на работу расширения сушильного агента при его нагревании. При изменении температуры сушки от 50 °С до 110 °С отношение затрат тепла на нагрев агента к затратам тепла на его изобарическое расширение меняется от 2,3 до 10. При этом сами затраты тепловой энергии уменьшаются, соответственно: в более чем 3 раза – затраты на нагрев и более чем в 23,5 раза – затраты на изобарическое расширение сушильного агента. Соответственно, общие затраты уменьшаются почти в 5 раз. При дальнейшем увеличении температуры в сушильной камере до 150 °С, согласно проведенному анализу, тепловые затраты энергии уменьшаются на общий нагрев в 5,86 раза, а потеря тепловой энергии на расширение – почти в 100 раз. Именно уменьшение расхода сушильного агента и влечет, главным образом, уменьшение тепловых потерь на расширение сушильного агента при его нагревании. В данном случае оценочные расчеты показали, что при увеличении температуры сушки с 50 °С до 150 °С расход атмосферного воздуха уменьшается почти в 300 раз. Даже при увеличении температуры сушки только до 100–110 °С, которая бывает предельно допустимой при сушке некоторых органических материалов, расход атмосферного воздуха уменьшается в 34–50 раз, что, в свою очередь, уменьшает потери тепла на изобарическое расширение воздуха в 17–23,5 раза.

Анализ сушки материала торфяных гранул методом СВЧ показал, что даже при наиболее оптимальном температурном режиме (95–105 °С) затраты энергии для работы генератора СВЧ в 2,65–3 раза превышают затраты энергии на сушку по методу 1. При этом, как показывают полученные зависимости, эти затраты не зависят от мощности генератора СВЧ и являются неизбежными при таком способе сушки. Следует ожидать, что затраты энергии на сушку методом СВЧ при увеличении объема высушиваемого материала будут еще более возрастать, ввиду возрастания доли излучения СВЧ во

внешнее пространство с увеличением размера излучающего контура. Более того, данный метод сушки ограничен по температурному режиму, т. е. нецелесообразно увеличивать температуру сушки, поскольку это лишь приводит к дополнительному нагреву высушиваемого материала и, как следствие, к увеличению потерь тепловой энергии.

Наконец анализ сушки того же материала по методу 2, т. е. методом обдува торфяных гранул нагретым до заданной температуры воздухом (сушильным агентом) в теплоизолированном барабане является наиболее затратным способом сушки. Рассмотренная для данного способа сушки модельная задача показала, что тепловые потери быстро возрастают, если скорость движения нагретого воздуха (скорость обдува материала) в сушильной камере (барабане) заметно отличается от скорости вытеснения влаги по методу сушки материала в нагретом барабане. Даже при движении нагретого воздуха в сушильной камере (барабане) со скоростью его вытеснения (как при сушке в нагретом барабане) тепловые затраты при таком способе сушки (нагретым воздухом в теплоизолированном барабане) превышают затраты тепла нагретого барабана в 1,1–1,3 раза для температур 100–110 °С и почти в 1,5 раза для температуры 150 °С. Это связано с тем, что при сушке нагретым воздухом (сушильным агентом) уменьшается его температура при удалении влаги из высушиваемого материала и поэтому процесс сушки протекает при пониженной температуре в отличие от процесса сушки в нагретом барабане. Этот недостаток способа сушки компенсируется дополнительным количеством сушильного агента и затратами тепла на его нагрев от исходной температуры (окружающего воздуха) до заданной температуры на входе в сушильную камеру (барабан).

Таким образом, для производственных масштабов сушка нагретым воздухом в барабане является весьма затратной в результате низкого КПД ввиду неэффективного теплообмена между сушильным агентом и высушиваемым материалом. Метод сушки СВЧ может использоваться только при относительно небольших объемах высушиваемого материала также ввиду малого КПД генератора и излучающего контура. Сушка материала методом СВЧ хотя и позволяет существенно сократить время процесса, однако сам режим сушки будет ограничен прочностью высушиваемого материала, а не мощностью генератора излучения СВЧ.

Список используемых источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с. : ил.
2. Лыков, М. В. Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. – М. : Химия, 1970. – 432 с.
3. Ольшанский, А. И. Кинетика тепловлагоденоса и температура в процессе сушки тканей / А. И. Ольшанский, А. С. Марущак // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 449–457.
4. Саломатов, В. В. Электромагнитная сушка влажных материалов с малой глубиной проникновения СВЧ-излучения в условиях теплосброса радиацией и конвекцией I. Стадия прогрева / В. В. Саломатов, В. А. Карелин, В. В. Саломатов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 10. – С. 49–60.
5. Саломатов, В. В. Электромагнитная сушка влажных материалов с малой глубиной проникновения СВЧ-излучения в условиях теплосброса радиацией и конвекцией II. Стадия постоянной скорости сушки / В. В. Саломатов, В. А. Карелин, В. В. Саломатов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 12. – С. 119–125.
6. Саломатов, В. В. Электромагнитная сушка влажных материалов с малой глубиной проникновения СВЧ-излучения в условиях теплосброса радиацией и конвекцией III. Стадия падающей скорости сушки / В. В. Саломатов, В. А. Карелин, В. В. Саломатов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 4. – С. 139–147.

References

1. Lykov A. V. *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968, 472 p.
2. Lykov M. V. *Drying in the chemical industry*. Moscow, Chemistry Publ., 1970, 432 p.
3. Olshansky A. I., Marushchak A. S. *Kinetika teplovlagoperenosa i temperatura v processe sushki tkanej* [Kinetics of heat and moisture transfer and temperature during fabric drying]. *Vestci Natsionalnay akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Gray physics-technical sciences, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 449–457.
4. Salomatov V. V., Karelin V. A., Salomatov V. V. *Elektromagnitnaya sushka vlazhnykh materialov s maloj glubinoj proniknoveniya SVCh-izlucheniya v usloviyah teplosbrosa radiaciej i konvekciej I. Stadiya progreva* [Electromagnetic drying of wet materials with a shallow penetration depth of microwave radiation under conditions of heat transfer by radiation and convection I. Heating stage]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* = *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 49–60.

5. Salomatov V. V., Karelin V. A., Salomatov V. V. *Elektromagnitnaya sushka vlazhnyh materialov s maloj glubinoj proniknoveniya SVCh-izlucheniya v usloviyah teplosbrosa radiaciej i konvekciej II. Stadiya postoyannoj skorosti sushki* [Electromagnetic drying of wet materials with a shallow penetration depth of microwave radiation under conditions of heat transfer by radiation and convection II. Stage of constant drying rate]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 119–125.
6. Salomatov V. V., Karelin V. A., Salomatov V. V. *Elektromagnitnaya sushka vlazhnyh materialov s maloj glubinoj proniknoveniya SVCh-izlucheniya v usloviyah teplosbrosa radiaciej i konvekciej III. Stadiya padayushchej skorosti sushki* [Electromagnetic drying of wet materials with a shallow penetration depth of microwave radiation under conditions of heat transfer by radiation and convection III. Stage of decreasing drying rate]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 139–147.

Информация об авторах

Калантаров Михаил Георгиевич – кандидат биологических наук, ведущий инженер, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Сорокин Александр Иванович – кандидат технических наук, заместитель директора Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Шилович Николай Николалевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет (Партизанский пр-т, 26, 220070, г. Минск, Беларусь). E-mail: shilnn@tut.by

Янута Юрий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Information about the authors

Mikhail G. Kalantarov – Ph. D. (Biological), leading engineer, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Alexander I. Sorokin – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, deputy director of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Nikolay N. Shilovich – Ph. D. (physical and mathematical), Associate Professor, Belarusian State Economic University (Partizansky Ave., 26, 220070, Minsk, Belarus). E-mail: shilnn@tut.by

Yuriy G. Yanuta – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, deputy director of the institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by