

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

XVII Міжнародної наукової конференції
**«УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ І
ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ТА
ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»**

3-8 вересня 2018 р.



**ОДЕСА
2018**

Публікуються доповіді, представлені на XVII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (3 – 8 вересня 2018 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

Доктор техн. наук, професор
Кандидат техн. наук

О.Г. Бурдо
Ю.О. Левтринська

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

Єгоров <i>Богдан Вікторович</i>	– голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
Бурдо <i>Олег Григорович</i>	– вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
Атаманюк <i>Володимир Михайлович</i>	– Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
Васильєв <i>Леонард Леонідович</i>	– Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н., професор
Гавва <i>Олександр Миколайович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Гумницький <i>Ярослав Михайлович</i>	– Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
Долинський <i>Анатолій Андрійович</i>	– Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАН України
Зав’ялов <i>Владимир Леонідович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Сукманов <i>Валерій Олександрович</i>	– Полтавський університет економіки і торгівлі, д.т.н., професор
Колтун <i>Павло Семенович</i>	– Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
Корнієнко <i>Ярослав Микитович</i>	– Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
Малежик <i>Іван Федорович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Михайлов <i>Валерій Михайлович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н., професор
Паламарчук <i>Ігор Павлович</i>	– Національний університет біоресурсів та природокористування України, д.т.н., професор
Снежкін <i>Юрій Федорович</i>	– Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., академік НАН України
Сорока <i>Петро Гнатович</i>	– Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
Тасімов <i>Юрій Миколайович</i>	– Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
Товажнянський <i>Леонід Леонідович</i>	– Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України
Ткаченко <i>Станіслав Йосифович</i>	– Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
Черевко <i>Олександр Іванович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н., професор
Шит <i>Михайл Львович</i>	– Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.
Сухий <i>Константин Михайлович</i>	– ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», д. хім. н., професор

СЕКЦІЯ 2.

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ
ПЕРЕНОСУ.
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ І СИСТЕМ**

4. Биткова Т.В. Построение системно-динамических моделей в среде Vensim. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Имитационное моделирование» для студентов специальностей «Экономическая кибернетика» и «Прикладная экономика». – Х.: ХНУ, 2004 – 52 с.

5. Патент на корисну модель 105419 Україна, МПК В01F 15/06 (2006.01), А21С 1/00. Пристрій для перемішування та нагрівання в'язких харчових продуктів / Сардаров А.М., Маяк О.А., Костенко С.М. (Україна); заявник та патентовласник Харк. держ. ун-т харч. та торг. – 201505846; заявл. 15.06.2015; опубл. 25.03.2016, Бюл. №6. – 4с.

6. Патент на корисну модель № 24105 Україна, МПК А21С 1/00. Пристрій для перемішування в'язких харчових продуктів / В.І. Маяк, В.М. Михайлов, М.М. Смілик (Україна). - №200611832; Заявл. 10.11.2006; Опубл. 25.06.2007, Бюл. №9.

УДК 532.516: 536.24

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ БИОМАССЫ

Сорокова Н.Н. д.т.н., с.н.с., Коринчук Д.Н. к.т.н., с.н.с.
Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Киев

MATHEMATICAL MODELING OF THE DYNAMICS OF HIGH-TEMPERATURE DRYING AND THERMAL DECOMPOSITION OF BIOMASS

Sorokova N.N., Korinchuk D.N.
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

Аннотация. Разработана математическая модель и численный метод расчета динамики теплопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел цилиндрической формы в условиях равномерного обдува теплоносителем. Математическая модель строилась на базе дифференциального уравнения переноса субстанции (энергии, массы, импульса) в деформируемых системах. Проведены экспериментальные исследования кинетики обезвоживания частиц энергетической вербы в потоке воздуха с целью верификации математической модели. Обоснована возможность ее использования для расчета совместных процессов сушки и начального этапа термического разложения биомассы. С использованием ранее полученных данных по значениям энергии активации $A_{эф}(T)$ для различных видов биомассы проведено математическое моделирование динамики и кинетики высокотемпературной сушки в потоке дымовых газов энергетической вербы, которая сопровождается термодеструкцией гемицеллюлозы. Результаты численных экспериментов свидетельствуют об адекватности предложенного подхода, эффективности математической модели и метода ее реализации. На их основе возможно проводить исследование динамики теплопереноса при сушке частиц различных видов измельченной биомассы; определение температуры начала и окончания первой стадии термического разложения; момента достижения равновесного влагосодержания в зависимости от свойств материала и сушильного агента. Эти данные позволяют выбирать оптимальные с точки зрения сохранения энергии и качества высушиваемого продукта режимные параметры процесса.

Abstract. A mathematical model and a numerical method for calculating the dynamics of heat and mass transfer, phase transformations and shrinkage during the drying of colloidal capillary-porous cylindrical bodies under conditions of equitable winding by a coolant are developed. The mathematical model was based on the differential equation of substance (energy, mass, impulse) transfer in deformable systems. Experimental studies of the kinetics of dehydration of energy willow particles in the airflow were carried out to verify the mathematical model. Its applicability for calculating combined processes of drying and of the initial stage of thermal decomposition of biomass is substantiated. Using the previously obtained data on the activation energy values for various types of biomass, a mathematical simulation of the dynamics and kinetics of high-temperature drying in the flue gas flow of energy willow was carried out, which is accompanied by thermal destruction of hemicellulose. The results of numerical experiments indicate the adequacy of the proposed approach, the effectiveness of the mathematical model and the method of its implementation. On their basis, it is possible to study the dynamics of heat and mass transfer when drying particles of different types of ground biomass; determination of the temperature of the beginning and ending of the first stage of thermal decomposition; the moment when the equilibrium moisture content is reached, depending on the properties of

the material and the drying agent. These data allow choosing the process parameters that are optimal in terms of energy saving and quality of the dried product.

Ключевые слова: биомасса, сушка, термодеструкция, математическое моделирование, цилиндрическая частица, барабанная сушилка, энергия активации.

Keywords: biomass, drying, thermal destruction, mathematical modeling, cylindrical particle, drum dryer, activation energy.

Использование биомассы растительного и древесного происхождения в качестве сырья для получения топливных брикетов и гранул имеет большой потенциал в возобновляемой энергетике Украины. Для получения пеллет высокого качества сырье должно иметь влажность 8 – 12%. В большинстве видов биомассы (солома, стебли кукурузы, подсолнечника, древесная стружка, энергетическая верба, сорго, мискантус) исходное содержание влаги по отношению к общей массе составляет 50 – 60%. Сушка биомассы осуществляется преимущественно в барабанных сушильных установках после ее предварительного измельчения. В зависимости от температуры T_c подаваемого в камеру теплоносителя, сушка может быть умеренно интенсивной (T_c составляет 120 – 170 °C) и высокотемпературной (при T_c 300 – 500 °C). В последнем случае обезвоживание биомассы сопровождается процессом ее термического разложения, начальная стадия которого характеризуется разложением гемицеллюлозы с выделением кислородосодержащих газов и пирогенетической влаги, что способствует повышению калорийности сухого остатка и соответственно биотоплива в целом. На последующих стадиях термодеструкции, при температурах выше 270 °C начинают разлагаться целлюлоза и лигнин, причем эти процессы в присутствии воздуха являются экзотермическими для всех видов биомассы и их интенсивное прохождение может привести к быстрому повышению температуры и существенной потере горючей составляющей. Поэтому важным моментом при разработке технологий высокотемпературной сушки биомассы является соблюдение условия прохождения первого этапа ее термического разложения и завершение процесса по достижении температуры, соответствующей последующим стадиям деструкции для данного вида биомассы.

Формулировка проблемы и анализ последних достижений. Создание сушильных технологий требует детального изучения явлений тепломассопереноса и фазовых превращений в высушиваемом материале при определенных условиях. Разработка технологий высокотемпературной сушки предполагает знание кинетических характеристик термического разложения данного вида биомассы в указанном интервале температур. Возможности экспериментальных методов исследования кинетики высокоинтенсивной сушки и термодеструкции в частицах малого размера весьма ограничены. Более перспективным методом исследования является математическое моделирование. Необходимость разработки математической модели совмещенных процессов сушки и термического разложения обоснована в [1]

В [2] была построена математическая модель и метод расчета динамики диффузионной сушки капиллярно-пористых тел в форме ограниченного цилиндра. Частицы всех видов биомассы представляют собой коллоидные капиллярно-пористые тела, а сушка в высокотемпературном сушильном агенте предполагает прохождение процессов переноса вследствие диффузии, фильтрации и фазовых превращений. Пирогенетическая вода удаляется вместе с остатками свободной и связанной влаги биомассы. В [3] были определены кинетические параметры десорбции физически связанной влаги и активационных процессов неизотермического разложения гемицеллюлозы древесной и растительной биомассы, которые свидетельствуют о том, что начало процесса термического разложения сопровождается резким повышением эффективной энергии активации частиц связанного вещества. Учет в математической модели этого явления позволит определять динамику тепломассопереноса при сушке частиц измельченной биомассы; температуру начала и окончания первой стадии термического разложения; момент достижения равновесного влагосодержания в зависимости от свойств материала и сушильного агента. На основе этих данных должны выбираться оптимальные с точки зрения сохранения энергии и качества режимные параметры процесса.

Основное исследование. Обычно барабанные сушильные аппараты оснащены лопаточными устройствами, которые способствуют интенсивному перемешиванию сырья и равномерному обдуву теплоносителем каждой частицы. Форма измельченных частиц биомассы имеет вид полых или сплошных цилиндров конечной длины. Математическая модель тепло- и массопереноса при обезвоживании коллоидных капиллярно-пористых частиц строится на базе уравнения переноса субстанции для деформируемых систем [4]

$$c_{эф} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + w_{эфr} \frac{\partial T}{\partial r} + w_{эфy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{эфr} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{эфy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - LI_V, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_{ж}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{жr} U_{ж})}{\partial r} + \frac{\partial (w_{жy} U_{ж})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{жr} r \frac{\partial U_{ж}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{жy} \frac{\partial U_{ж}}{\partial y} \right) - I_V - \frac{U_{ж}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_{п}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{пr} U_{п})}{\partial r} + \frac{\partial (w_{пy} U_{п})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{пr} r \frac{\partial U_{п}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{пy} \frac{\partial U_{п}}{\partial y} \right) + I_V - \frac{U_{п}}{1 - \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_B}{\partial t} + \frac{\partial(w_{gr}U_B)}{\partial r} + \frac{\partial(w_{ry}U_B)}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_B r \frac{\partial U_B}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_B \frac{\partial U_B}{\partial y} \right) - \frac{U_B}{1-\varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}. \quad (4)$$

Здесь T — температура; $U_{ж}$, $U_{п}$ и $U_{в}$ — объемные концентрации жидкости, пара и воздуха; t — время; $\lambda_{эф}$, $c_{эф}$ — эффективные теплоемкость и теплопроводность и тела, $c_{эф} = c_T U_T + c_{ж} U_{ж} + c_{п} U_{п} + c_{в} U_{в}$, $\lambda_{эф} = \lambda_T U_T / \rho_T + \lambda_{ж} U_{ж} / \rho_{ж} + \lambda_{п} U_{п} / \rho_{п} + \lambda_{в} U_{в} / \rho_{в}$; $D_{ж}$, $D_{п}$, $D_{в}$ — эффективные коэффициенты диффузии компонентов, $D_{ж} = \gamma_D [\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}$ (формула Н.И.Никитенко [5]), $D_{п} = D_{в} = \gamma_{п} T^{3/2} / P_r$, A_D — энергия активации; I_V — интенсивность испарения жидкости в теле; L — удельная теплота испарения; ε_V — относительная объемная деформация; $w_{эфk}$ — эффективная скорость связанного вещества в направлении k ($k = r, y$), $w_{эфk} = [w_{жk} c_{ж} U_{ж} + w_{rk} (c_{п} U_{п} + c_{в} U_{в})] / c_{эф}$.

Скорости фильтрации w_{ψ} жидкой и газовой фаз ($\psi = ж, г$) находятся по закону Дарси: $w_{\psi} = -K_0 K_{\psi} / \eta_{\psi} \nabla P_{\psi}$, где K_0 — общая проницаемость среды; K_{ψ} — относительная проницаемость фазы ψ ; η_{ψ} — динамический коэффициент вязкости фазы ψ , P_{ψ} — парциальное давление фазы ψ . Для нахождения $P_{ж}$ и $P_{г}$ необходимо располагать функциями $U_{ж}$, $U_{п}$, $U_{в}$ и T . При этом определяются объемные доли скелета Ψ_T , жидкости Ψ_p и газа Ψ_g в пористых гранулах: $\Psi_T = 1 - \Pi$, $\Psi_{ж} = U_{ж} / \rho_{ж}$ и $\Psi_g = 1 - \Psi_T - \Psi_{ж}$, где Π — пористость, $\rho_{ж}$ — плотность жидкости. Далее рассчитываются парциальные плотности пара и воздуха $\rho_{п} = U_{п} / \Psi_T$, $\rho_{в} = U_{в} / \Psi_g$, а затем парциальные давления $P_{п} = \rho_{п} R_y T / \mu_{п}$ и $P_{в} = \rho_{в} R_y T / \mu_{в}$. Давление газовой смеси представляется суммой $P_g = P_{п} + P_{в}$, а давление жидкой фазы равно $P_{ж} = P_g + P_k$. Капиллярное давление P_k находится как среднее

капиллярное давление жидкости [4]: $P_k = \int_{r_{min}}^{r_{max}} P_{k/l} dV / \int_{r_{min}}^{r_{max}} dV$. Объем жидкости в капиллярах с радиусами от r до $r+dr$ в единичном объеме тела пропорционален дифференциальной функции $F(r)$ распределения пор по размерам $dV(r) = \theta(r) F(r) dr$, где $\theta(r)$ — объемная доля капилляра, занятая жидкостью. В результате получаем выражение, аналогичное формуле Лапласа

$$P_k = 2\sigma(T) \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{\theta(r)}{r} F(r) dr / \int_{r_{min}}^{r_{max}} \theta(r) F(r) dr = \frac{2\sigma(T)}{r^*}, \quad r_{min} < r^* < r_{max}. \quad (5)$$

Здесь r_{min} и r_{max} — минимальный и максимальный радиусы пор единичного объема, r^* — характеристический параметр дисперсности размеров пор.

Интенсивность испарения жидкости на внешних поверхностях частиц биомассы [6] находится как разность потоков испаряющейся жидкости и конденсирующегося пара

$$I = \gamma_c \left\{ \rho_T \Big|_{v=0} \left(\exp \left[\frac{A}{RT} \Big|_{v=0} \right] - 1 \right)^{-1} - \varphi_c \left(\exp \left[\frac{A}{RT_c} \right] - 1 \right)^{-1} \right\}, \quad \gamma_c = \varepsilon \rho_{ж} \delta^* / 4. \quad (6)$$

Здесь γ_c — коэффициент поверхностного испарения; ε — коэффициент излучения, $1/c$; δ^* — средняя длина диффузионного перескока активизированной частицы в слое жидкости; φ_T — влажность парогазовой смеси, которая соответствует согласно изотерме сорбции концентрации $U_{ж}$ в данной точке тела; v — нормаль к поверхности; T_c и φ_c — температура и относительная влажность внешней среды; A — энергия активации.

Выражение для интенсивности испарения в единичном объеме тела следует из формулы (6) при условии локального термодинамического равновесия

$$I_V = \gamma_c [\exp(A / RT) - 1]^{-1} (\varphi_T - \varphi) S. \quad (7)$$

Здесь S — площадь контакта жидкой и газовой фаз в порах тела не полностью заполненных жидкостью.

Для нахождения функции S в единичном объеме тела в работе [7] получена формула

$$S = \frac{2\sqrt{1-\varphi_T}}{\rho_{ж} \delta^*} \frac{\partial U_{ж}}{\partial \varphi_T}. \quad (8)$$

Производная $\partial U_{ж} / \partial \varphi_T$ находится из уравнения изотермы десорбции. Если изотерма задана в виде $U_{ж} = U_{max} \varphi_T^g$, $g = \text{const}$, то $\partial U_{ж} / \partial \varphi_T = U_{max} g \varphi_T^{g-1}$. Данные по равновесному влагосодержанию для древесины представленные в [8] довольно точно описывается уравнением $W^{-1} = W_{max}^{-1} - 0,12 \ln \varphi$, где максимальное влагосодержание W_{max} соответствует $\varphi = 1$ и при температуре 100 °C составляет 16%, а $U_{ж} = 0,01 W \rho_T$.

Относительная объемная деформация ε_V находится с помощью аналитического решения осесимметричной задачи о напряженном состоянии полого цилиндра, полученного в [9] при условии, что деформации происходят вследствие неоднородности полей температуры и концентрации компонентов связанного вещества, а также под влиянием равномерно распределенных давлений: P_0 на внутренней цилиндрической поверхности радиуса $r = r_0$, P на внешней поверхности радиуса $r = R$ и результирующей силы P_z вдоль оси цилиндра z :

$$u_r(r) = \frac{1}{r(1-\nu_{\Pi})} \left[(1+\nu_{\Pi}) \int_{r_0}^r N r dr + \frac{r^2(1-3\nu_{\Pi}) + r_0^2(1+\nu_{\Pi})}{R^2 - r_0^2} \int_{r_0}^R N r dr + \frac{r \nu_{\Pi} P_z}{E_y \pi (R^2 - r_0^2)} \right] + \frac{1}{E_y r (R^2 - r_0^2)} \left[r^2(1-\nu_{\Pi})(P_0 r_0^2 - P R^2) + (1+\nu_{\Pi}) r_0^2 R^2 (P_0 - P) \right], \quad (9)$$

$$\varepsilon_z = \frac{2}{R^2 - r_0^2} \int_{r_0}^R N r dr - \frac{2\nu_{\Pi}}{E_y} \frac{P_0 r_0^2 - P R^2}{R^2 - r_0^2} - \frac{P_z}{E_y \pi (R^2 - r_0^2)}, \quad (10)$$

где u_r , ε_z — проекции вектора перемещения на оси r и z ; ν_{Π} — коэффициент Пуассона; E_y — модуль упругости; N — термоконцентрационная функция [7, 9], $N = \beta_T(T - T_0) + \sum_{\Psi} \beta_{\Psi}(\omega_{\Psi} - \omega_{\Psi 0})$, ω_{Ψ} — массосодержание компонента Ψ , $\beta_T = (\partial x / \partial T) / x$ и $\beta_{\Psi} = (\partial x / \partial \omega_{\Psi}) / x$ — средние коэффициенты термического и концентрационного расширения в интервалах температуры $[T, T_0]$ и массовой концентрации компонента Ψ $[\omega_{\Psi}, \omega_{\Psi 0}]$. При $r_0 = 0$, (9) и (10) представляют решение задачи термоконцентрационной упругости для сплошного цилиндра. Нормальные компоненты тензора деформаций ε_{rr} , $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ и ε_{zz} находятся из соотношений $\varepsilon_{rr} = \partial u_r / \partial r$, $\varepsilon_{\varphi\varphi} = u_r / r$, $\varepsilon_{zz} = \partial u_z / \partial z = \varepsilon_z$, откуда $\varepsilon_V(t) = [1 + \varepsilon_{rr}(t)][1 + \varepsilon_{\varphi\varphi}(t)][1 + \varepsilon_{zz}(t)] - 1$. Если тело является капиллярно-пористым, его усадкой в процессе сушки можно пренебречь и $\varepsilon_V = 0$.

Условия теплообмена на границе $r = 0$ для сплошного цилиндра представляют условия симметрии полей температуры, концентраций и скоростей фильтрации компонентов связанного вещества

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{\Pi}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{\text{в}}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial w_{\text{жг}}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial w_{\text{гр}}}{\partial r} \right|_{v=0} = 0. \quad (11)$$

На поверхностях, контактирующих с сушильным агентом задаются граничные условия третьего рода

$$\lambda_{\text{эф}} \left. \frac{\partial T}{\partial v} \right|_{v=0} = \alpha(T_c - T|_{v=0}) - L\gamma_c \left\{ \varphi_{\text{г}}|_{v=0} \left[\exp\left(\frac{A}{RT|_{v=0}}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_{\text{с}} \left[\exp\left(\frac{A}{RT_c}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (12)$$

$$D_{\text{ж}} \left. \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial v} \right|_{v=0} = \gamma_c \left\{ \varphi_{\text{г}}|_{v=0} \left[\exp\left(\frac{A}{RT|_{v=0}}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_{\text{с}} \left[\exp\left(\frac{A}{RT_c}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (13)$$

$$-D_{\Pi} \left. \frac{\partial U_{\Pi}}{\partial v} \right|_{v=0} = \gamma_{\text{пс}} (U_{\Pi}|_{v=0} - P_{\text{пс}} \Psi_{\Pi}), \quad U_{\text{в}}|_{v=0} = \frac{P_{\text{с}} \Psi_{\text{г}} \mu_{\text{в}}}{R T|_{v=0}} - U_{\Pi}|_{v=0} \frac{\mu_{\text{в}}}{\mu_{\Pi}}. \quad (14)$$

Коэффициент теплоотдачи α определяется с использованием формулы [10] $Nu = 0,98(0,43 + 0,55Re^{0,5}Pr^{0,38})$. Для поверхности $r = r_0$ при $T_c = \text{const}$ можно принять $Nu = 3,66$ [10].

Решение дифференциальных уравнений (1) – (4) при граничных условиях (11) – (14) может быть проведено численным методом на базе явной трехслойной пересчетной разностной схемы Никитенко Н.И. [7] и процедуре расщепления алгоритма по физическим факторам. Разностная аппроксимация уравнения переноса жидкой фазы (2) на равномерной разностной сетке $r_i = R_{\text{вн}} + ih$, ($i = 0, 1, \dots, I$; $h = \text{const}$, $R_{\text{вн}} > 0$), $x_m = mh_y$, ($m = 0, 1, \dots, M$; $h_y = \text{const}$), $t_n = nl$ ($n = 0, 1, \dots, l > 0$) в соответствии с указанной схемой представляется в виде

$$\frac{\bar{U}_{\text{ж},i,m}^{n+1} - U_{\text{ж},i,m}^n}{l} = - \left[\left((w_{\text{жр}} U_{\text{ж}})_{i+1,m}^n - (w_{\text{жр}} U_{\text{ж}})_{i,m}^n \right) - \left((w_{\text{жр}} U_{\text{ж}})_{i,m}^n - (w_{\text{жр}} U_{\text{ж}})_{i-1,m}^n \right) \right] / (2h^2) - \left[\left((w_{\text{жy}} U_{\text{ж}})_{i,m+1}^n - (w_{\text{жy}} U_{\text{ж}})_{i,m}^n \right) - \left((w_{\text{жy}} U_{\text{ж}})_{i,m}^n - (w_{\text{жy}} U_{\text{ж}})_{i,m-1}^n \right) \right] / (2h_y^2), \quad (15)$$

$$(1 + \Omega_{\text{ж}}) \frac{\tilde{U}_{\text{ж},i,m}^{n+1} - \bar{U}_{\text{ж},i,m}^{n+1}}{l} - \Omega_{\text{ж}} \frac{U_{\text{ж},i,m}^n - U_{\text{ж},i,m}^{n-1}}{l} = - \left[\left((w_{\text{жр}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i+1,m}^{n+1} - (w_{\text{жр}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i,m}^{n+1} \right) - \left((w_{\text{жр}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i,m}^{n+1} - (w_{\text{жр}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i-1,m}^{n+1} \right) \right] / (2h^2) - \left[\left((w_{\text{жy}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i,m+1}^{n+1} - (w_{\text{жy}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i,m}^{n+1} \right) - \left((w_{\text{жy}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i,m}^{n+1} - (w_{\text{жy}} \bar{U}_{\text{ж}})_{i,m-1}^{n+1} \right) \right] / (2h_y^2) + \frac{1}{2r_{i,m}} \left[D_{\text{ж},i+1,m} r_{i+1,m} + D_{\text{ж},i,m} r_{i,m} \right] (\bar{U}_{\text{ж},i+1,m}^{n+1} - \bar{U}_{\text{ж},i,m}^{n+1}) - \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 & - (D_{ж,i,m}r_{i,m} + D_{ж,i-1,m}r_{i-1,m}) (\bar{U}_{ж,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{ж,i-1,m}^{n+1}) / h^2 + [(D_{ж,i,m+1} + D_{ж,i,m}) (\bar{U}_{ж,i,m+1}^{n+1} - \bar{U}_{ж,i,m}^{n+1}) - \\
 & (D_{ж,i,m} + D_{ж,i,m-1}) (\bar{U}_{ж,i,m}^{n+1} - \bar{U}_{ж,i,m-1}^{n+1})] / (2h_y^2) - I_V, \\
 & \frac{U_{ж_i}^{n+1} - \tilde{U}_{ж_i}^{n+1}}{l} = \frac{\tilde{U}_{ж_i}^{n+1}}{1 + \epsilon_V} \frac{\epsilon_V^{n+1} - \epsilon_V^n}{l}. \tag{17}
 \end{aligned}$$

Аналогичным образом аппроксимируются дифференциальные уравнения (3), (4), а уравнение переноса энергии (1), не содержащее функцию ϵ_V аппроксимируется первыми двумя разностными уравнениями.

Необходимые условия устойчивости уравнений вида (15) — (17) находятся методом условного задания некоторых искомых функций системы [7]: $l_{ж} \leq \left\{ (w_{жr} / h + w_{жy} / h_y)^{-1}; (1 + 2\Omega_{ж}) / [2D_{ж} (h^{-2} + h_y^{-2})] \right\}$. Расчетный шаг по времени определяется из условия $l \leq \min(l_T; l_{ж}; l_{п}; l_{в})$.

Разностная аппроксимация граничного условия (13) для поверхности $r = R$ представляется в виде

$$D_{ж} \frac{\bar{U}_{жI}^{n+1} - \bar{U}_{жI-1}^{n+1}}{h} = \gamma_c \left\{ \varphi_{TI} \left[\exp(A / R_y \bar{T}_I^n) - 1 \right]^{-1} - \varphi_c \left[\exp(A / R_y T_c) - 1 \right]^{-1} \right\}. \tag{18}$$

Обсуждение результатов. Для подтверждения адекватности разработанной математической модели и эффективности численного метода расчета было проведено физическое моделирование кинетики сушки частиц энергетической вербы цилиндрической формы в потоке воздуха и математическое моделирование процесса при тех же исходных данных: $T_0 = 303$ К; $W_0 = 1,3$ кг/кг; $\lambda_r = 0,15$ Вт/(м·К); $c_r = 1840$ Дж/(кг·К); $\rho_r = 450$ кг/м³; $A = A_D = 0,4205 \cdot 10^8$ Дж/кмоль; $\Pi = 0,58$. Результаты расчета и экспериментальные данные, представленные на рис.1, достаточно хорошо согласуются.

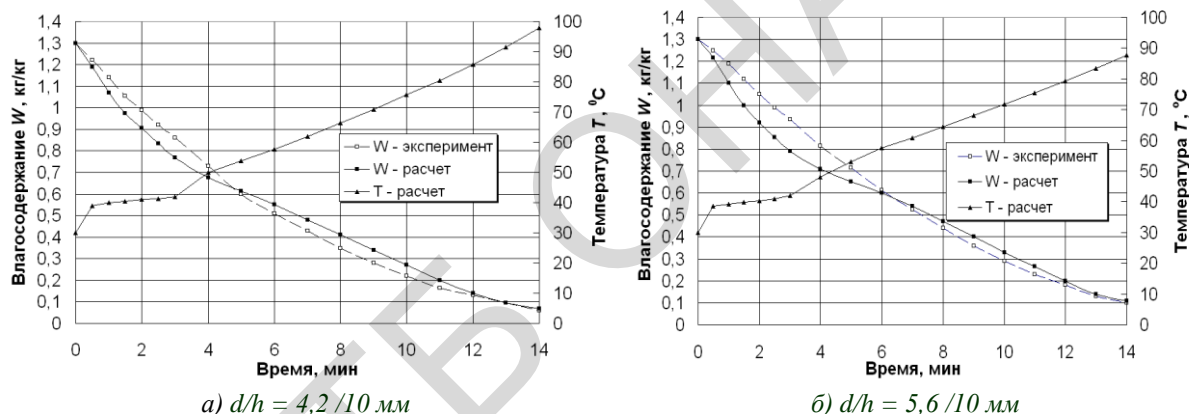


Рис. 1. Изменение во времени средних значений влагосодержания W и температуры T частиц энергетической вербы цилиндрической формы различного диаметра при сушке в потоке воздуха с параметрами $T_c = 120$ °С, $w_c = 2$ м/с, $d_c = 18$ г/кг с.в.

Далее проводился расчет высокотемпературной сушки без учета термического разложения, а также сушки и начального этапа термического разложения энергетической вербы в потоке дымовых газов в условиях равномерного обдува частиц. Температура теплоносителя задавалась в интервале 300 — 500 °С. При расчете совместных процессов сушки и термодеструкции в математической модели по достижении материалом температуры 150 °С (начала проявления термодеструкции) менялось значение энергии активации физико-химически связанной с телом воды на среднее эффективное значение, соответствующее температурному интервалу разложения гемицеллюлоз, определенное из эксперимента [3]. Для лиственных пород деревьев $A_{дф} = A_{Dдф} = 0,7525 \cdot 10^8$ Дж/кмоль. На рис.2 представлены результаты численных экспериментов.

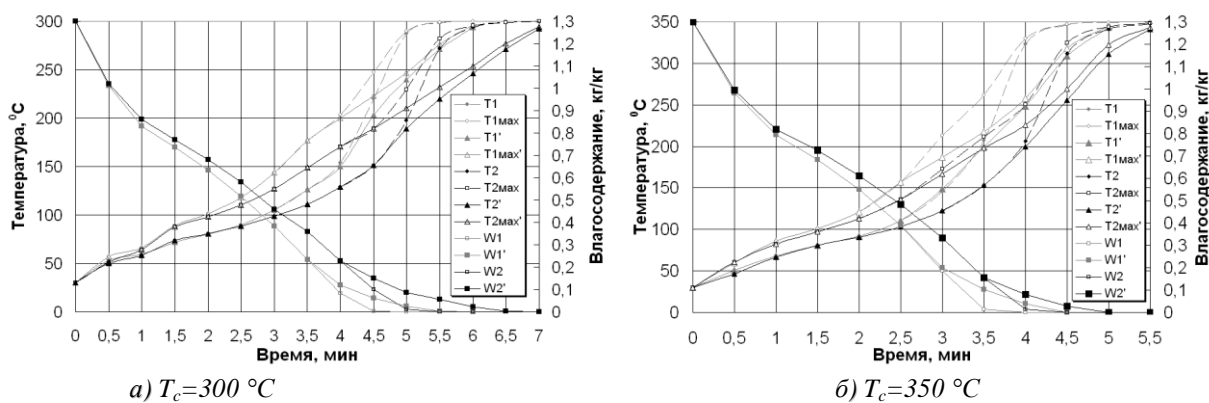


Рис. 2 Изменение во времени средних значений влагосодержания W , температуры T , и максимальной температуры T_{max} на поверхности цилиндрических частиц энергетической вербы с размерами $d/h = 4,2 / 10$ мм (кривые 1) и $d/h = 5,6 / 10$ мм (кривые 2) при сушке без учета термодеструкции и с ее учетом (W' , T' , T_{max}') в потоке дымовых газов с параметрами $w_c = 2$ м/с, $d_c = 18$ г/кг с.в.

Выводы. Процесс термического разложения, как и процессы диффузии и испарения, является активационным. Вследствие того, что энергия активации, необходимая для перехода частиц гемицеллюлозы в свободное состояние существенно выше, чем энергия активации частиц связанной воды, расчет высокотемпературной сушки биомассы необходимо проводить с учетом проявляющегося на заключительной стадии обезвоживания первого этапа термического разложения. Разработанная математическая модель и метод расчета процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и деформирования при обезвоживании цилиндрических коллоидных капиллярно-пористых тел позволяет учесть влияние термического разложения на динамику изменения влагосодержания и температуры материала биомассы, оптимизировать технологический процесс сушки биомассы и повысить калорийность получаемого из нее биотоплива.

Литература

1. Снежкін Ю.Ф., Корінчук Д.М., Безгін М.М. Дослідження режимів термообробки біомаси та торфу у виробництві композиційного біопалива // Пром. теплотехніка. 2017. Т. 39, №1. С 53 – 57.
2. Сорокова Н.М. Математичне моделювання динаміки сушіння капілярно-пористих тіл циліндричної форми кінцевої довжини // Харчова промисловість. 2008. №6. С. 67 – 69.
3. Коринчук Д.Н. Неизотермический анализ компонентов композиционных топлив на основе торфа и биомассы // Энергетика і автоматика. 2018. №1. С. 56–71.
4. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки с целью оптимизации процесса сушки термолабильных материалов // ИФЖ. 2005. Т. 78, № 1. С. 74 – 87.
5. Никитенко Н.И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах // ИФЖ. 2000. Т. 73 № 4. С. 851–839.
6. Никитенко Н.И. Исследование динамики испарения конденсированных тел на основе закона интенсивности спектрального излучения частиц// ИФЖ. 2002. Т.756 № 3. С. 128–134.
7. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н., Кольчик Ю.Н. Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена. Киев: Наукова думка, 2014. 744 с.
8. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 372 с.
9. Никитенко Н.И., Кольчик Ю.Н. Метод канонических элементов для моделирования переносных процессов в многосвязных областях произвольной формы. Инж.-физ. журн. 1999. Т.72, № 5. С. 837 – 843.
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКТОРА НАСИЧЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ЦУКАТІВ	
Гузьова І.О., Атаманюк В.М.	78
УНИФИЦІРОВАННИЙ ПОДХОД К МОДЕЛЮВАННЮ КАВІТАЦІОННИХ РЕАКТОРІВ	
Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е., Коник А.В., Целень Б.Я., Гоженко Л.П.	84
МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У АПАРАТІ З ПНЕВМАТИЧНИМ ПЕРЕМІШУВАННЯМ	
Данилюк О. М., Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.	89
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УВАРЮВАННЯ СОКУ ТА ЙОГО ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	
Маяк О.А., Сардаров А.М., Костенко С.М., Гриценко О.Ю., Шершньов Г.Г.	94
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ БИОМАССЫ	
Сороковая Н.Н., Коринчук Д.Н.	99

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТА ЕКОЛОГІЧНО-БЕЗПЕЧНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АДСОРБЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ ГЕЛПОУСТАНОВОК	
Беляновська О.А., Пустовой Г. М., Суха І.В., Губинський М.В., Литовченко Р.Д., Сухий К.М.	106
ЗАСТОСУВАННЯ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ВИЛУЧЕННІ БІЛКІВ ЗІ СТІЧНИХ ВОД ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ	
Сабадаш В.В., Гумницький Я.М.	111
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ІЗ ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ	
Пазюк В.М.	116
ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСА ТЕПЛООБМЕНА СОЛНЕЧНОЇ УСТАНОВКИ	
Селихов Ю.А., Коцаренко В.А.	120
ВИКОРИСТАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБАВОК У ПРОЦЕСАХ КОМПОСТУВАННЯ ХАРЧОВОЇ СКЛАДОВОЇ ТВЕРДИХ МУНІЦИПАЛЬНИХ ВІДХОДІВ	
Крусір Г.В., Сагдєєва О.А., Чернишова О.О., Мадані М.М., Гаркович О.Л.	125
ПРО ЗБЕРЕЖЕННЯ ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ ТА ЗАОЩАДЖЕННЯ РЕСУРСІВ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ТОМАТІВ	
Гаврилов О.В.	131
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ РОБОТИ БАРАБАНОЇ СУШАРКИ КОМПЛЕКСУ ВИРОБНИЦТВА КОМПОЗИЦІЙНОГО БІОПАЛИВА	
Коринчук Д. М., Снєжкін Ю.Ф., Бунецький В. О.	134
ТЕХНОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ УТИЛІЗАЦІЇ-МОДИФІКАЦІЇ ПОЛІМЕРНОЇ ТАРИ ТА ПАКУВАННЯ	
Бухкало С.І.	140
ЗАСТОСУВАННЯ СОЛЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ РІЗНОГО ТИПУ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННИХ КОМПЛЕКСІВ	
Ощипок І.М.	143

ІННОВАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ, ФАРМАЦЕВТИЧНИХ, ХІМІЧНИХ ТА ПАРФУМЕРНИХ ВИРОБНИЦТВ

АНАЛІЗ СИРОВИНИ, ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ХАРЧОВИХ ПОРОШКІВ	
Потапов В.О., Євлаш В.В., Педорич І.П.	149
ІНФРАЧЕРВОНЕ СУШІННЯ ЗЕРНОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВІБРОХВИЛЬОВИМ КОНВЕЄРОМ. ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ	
Паламарчук І.П., Кюрчев С.В., Верхоланцева В.О.	153
РАЦІОНАЛЬНЕ КОМПОНУВАННЯ ФАЗНИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ З МОДУЛЬНИМИ СЕПАРАЦІЙНИМИ ПРИСТРОЯМИ	