# ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ 

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

## VІ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ <br> « /ННОВАЦГЙН/ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГ/Ї»

Публікуються доповіді, представлені на VI Міжнародній науковопрактичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (4-8 вересня 2017 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
О.Г. Бурдо
Ю.О. Левтринська
Е.Ю. Ананійчук
О.В. Катасонов

# МІЖНАРОДНЫЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ 

## Єгоров

Богдан Вікторович
Бурдо
Олег Григорович
Атаманюк
Володимир Михайлович
Васильєв
Леонард Леонідович
Гавва
Олександр Миколайович
Гумницький
Ярослав Михайлович
Долинський
Анатолій Андрійович
Зав'ялов
Владимир Леонідович
Керш
Владимир Яковлевич
Колтун
Павло Семенович
Корнієнко
Ярослав Микитович
Малежик
Іван Федорович
Михайлов
Валерій Михайлович
Паламарчук
Ігор Павлович
Снежкін
Юрій Федорович
Сорока
Петро Гнатович
Тасімов
Юрій Миколайович
Товажнянський
Леонід Леонідович
Ткаченко
Станіслав Йосифович
Ульєв
Леонід Михайлович
Черевко
Олександр Іванович Шит
Михаїл Львович

- голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
- вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
- Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
- Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н, професор
- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Національний університет „Львівська політехніка", д.т.н., професор
-Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАНУ
- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Одеська державна академія будівництва та архітектури, д.т.н., професор
- Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
- Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут", д.т.н., професор
- Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
- Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н, професор
- Винницький національний аграрний університет, д.т.н., професор
-Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., член-кор. НАНУ
- Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
- Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
- Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут", д.т.н., професор
- Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
- Національний технічний університет Харківський політехнічний інститут", д.т.н., професор
- Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н, професор
- Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.


# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ ТОРФА И БИОМАССЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВ <br> Снежкин Ю.Ф., д-р техн. наук, профессор, Коринчук Д.Н. канд. техн. наук, ст. научный сотрудник <br> Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев 

# MODELING OF HIGH-TEMPERATURE DRYING OF PEAT AND BIOMASS IN BIOFUEL PRODUCTION TECHNOLOGIES <br> Sneszkin Yu.F., Korinchuk D. N <br> Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv 


#### Abstract

Аннотация: Статья посвящена разработке математической модели прочесса высокотемпературной сушки торфа и растительной биомассьь в технололгиях производства твердых биотоплив. Предложенная математическая модель учитывает наиболее характерные стороньь процесса высокотемпературной сушки частии.

По аналогии с процессами, связанными с движением грании фазового раздела, предполагается, что испарение жидкости осуществляется главным образом в узкой зоне, распространяющейся по мере сушки в глубь материала и разделяющей области, занятые паром и жидкостью. Ширина зоньь испарения определяется размером клеток или пор сырья, что значительно меньше характерного размера высушиваемого тела и позволяет заменить зону испарения фронтом испарения пренебрежимо малой толщины. В сухой области перемещается только пар, во влажной влагосодержание остается неизменным и равно начальному. Градиент температуры во влажной области отсутствует, т.е. частийа прогрета равномерно до температурь фазового перехода. По мере высыхания в сухой области формируется распределение температур, описываемое законами теплопроводности. Скорость продвижения гранииы сухой зоны определяется из уравнения баланса тепла и влаги на границе фронта испарения. Изменение влагосодержания частииь определяется пропориионально отношению координаты продвижения фронта испарения к радиусу частицы. Для частии торфа модельным телом принята сфера, для растительной биомассы модельным телом принято цилиндр.

Получены аналитическим путем уравнения позволяют определить время высыхания частии до заданной влажности. Представлены результаты экспериментальных исследований процесса суики частии торфа и древесины при температурах $120{ }^{\circ} \mathrm{C}$ и $140{ }^{\circ} \mathrm{C}$. Подтверждена адекватность математической модели. Среднестатистическое отклонение экспериментальных и расчетных значений не превысило $3 \%$, что позволяет сделать вывод о достаточной точности описания процесса сушки данной моделью и возможности ее применения для разработки инженерных методик расчета и оптимизации режимов работы сушильного оборудования технологий производства твердых биотоплив.

Absstract: The article is dedicated to the development of a mathematical model for the process of hightemperature drying of peat and biomass in technologies for the solid biofuels production. The proposed mathematical model takes into account the most specific aspects of high-temperature drying of particles.

By analogy with the processes associated with the moving the boundaries of the phase separation, it is assumed that the evaporation of the liquid is carried out mainly in a narrow zone, which spreads while drying into the depth of the material and which is separating the areas occupied by the vapor and liquid. The width of the evaporation zone is determined by the size of the cells or pores of the raw material, which is much smaller than the characteristic size of the body being dried, that allows substituting the evaporation zone with a vaporization front of negligible thickness. In a dry part only steam moves, in a moist part the moisture content remains unchanged and equal to the initial value. The temperature gradient in a moist part is absent, i.e. a particle is heated evenly up to the temperature of the phase transition. As the drying proceeds in a dry part a temperature ranging is being formed, which is described by the laws of thermal conductivity. The rate of moving the dry zone boundary is determined from the equation of heat and moisture balance at the boundary of the evaporation front. The change in the moisture content of a particle is determined in proportion to the ratio of the coordinate of advancing the evaporation front to the radius of a particle. For particles of peat a sphere is adopted as a model body, a cylinder is adopted as a model body for plant biomass.


The equations obtained by the analytical method allow determining the time of drying particles to a specific humidity. The results of the experimental studies of the process of drying of peat and wood particles are presented. The adequacy of the mathematical model is confirmed. The average statistical deviation for the experimental and calculated values did not exceed $3 \%$, that allows concluding about the sufficient accuracy for the description of the drying process given with applying proposed model and the possibility of its application for the development of engineering techniques for calculating and optimizing the operation modes of drying equipment for solid biofuel production technologies.

Ключевые слова: биотопливо, биомасса, торф, сушка, математическая модель, квазистационарный режим.

Key words: Bio-fuel, biomass, peat, drying, mathematical model, quasi-stationary mode.
Постановка проблемы. В современных условиях, когда наблюдается возрастание дефицита и рост цен на традиционные энергоносители, особая роль в обеспечении энергетической независимости страны отводится альтернативной энергетике. Альтернативой природному газу в Украине выступает растительная и древесная биомасса, а также торф. В природном, неподготовленном состоянии это относительно сложные объекты для энергетического использования. Технологии переработки биомассы, включающие дробление, сушку и гранулирование позволяют нормализовать по влажности, гранулометрическому составу биотопливо, увеличить его объёмную теплоту сгорания, что повышает эффективность использования топлива в котельном оборудование, снижает транспортные и складские затраты.

Наиболее энергоёмким в технологиях переработки биомассы и торфа в биотопливо является процесс обезвоживания [1]. Разработка и применение в производстве новых эффективных способов сушки биомассы, создание высокопроизводительного сушильного оборудования, совершенствование работы существующих сушилок способствует рациональному использованию природных ресурсов, снижению себестоимости биотоплива и повышению конкурентоспособности производства.

В настоящее время в технологиях производства твердого биотоплива в Украине эксплуатируется несколько типов сушилок, использующих в качестве теплоносителя высокотемпературные топочные газы. Из них наиболее перспективны аэродинамические сушилки, которые более просты в изготовлении и не требуют сложного энергетического оборудования. Основным и общим недостатком существующих конструкций аэродинамических сушилок является сравнительно невысокая интенсивность тепло- и массообменных процессов, что увеличивает их габариты и расход тепла на сушку. Основные требования, предъявляемые к высушенному продукту, состоят в том, что влагосодержание смеси перед прессованием не должно превышать 0,2 кг/кг, а влагоразность отдельных фракций - 0,15 кг/кг с. в. Как показывает практика [1], большинство сушилок являются достаточно энергоемкими, и тем не менее, не обеспечивают нужного качества сушенки. Все это снижает эффективность работы технологических линий, оснащенных аэродинамическими сушилками и сдерживает их широкое внедрение.

Исследования в области моделирования процессов высокотемпературной сушки биомассы и торфа, позволят разработать и обосновать методы интенсификации процесса сушки, разработать инженерные методики расчета оборудования и обеспечить создание наиболее рациональных конструкций сушильных установок.

Цель работы. Целью данной работы является разработка модели, описывающей тепломассообмен влажной частицы с высокотемпературным газом и определение ее корректности на основе экспериментальных исследований.

Анализ предыдущих исследований. В общем случае исследование сушки пористого тела связано с решением весьма сложной задачи движения двухфазной газожидкостной смеси при наличии фазового перехода и одновременного переноса тепла в трехфазной системе. Эта задача существенно нелинейна в связи с зависимостью коэффициентов в уравнениях движения и конвективной теплопроводности (например, проницаемости пористого тела для обеих движущихся фаз, эффективного коэффициента теплопроводности и т.п.) от температуры, влагосодержания и других неизвестных величин. Задача еще более усложняется необходимостью учета кинетики фазового превращения и межфазового теплообмена, капиллярных явлений, вызывающих перетекание жидкости из крупных пор в мелкие, а также явлений десорбции или перехода химически связанной жидкости в свободное состояние. Строгая теория сушки отсутствует, и имеются лишь попытки дать полуфеноменологическое описание этого процесса. Упрощенные модели сушки такого типа предложены в работах [2-4]. Однако эти модели также содержат большое число неизвестных величин, входящих в нелинейные дифференциальные уравнения, решения которых могут быть получены лишь в частных случаях и имеют весьма громоздкий вид, затрудняющий

их практическое использование. Вместе с тем в ряде случаев такие факторы, как, например, адсорбционно-связанная влага, перемещение жидкости в порах и другие, несущественны, так что могут быть предложены вполне обозримые модели таких процессов, позволяющие получить корректные результаты, достаточные для практических целей. По аналогии с процессами, связанными с движением границ фазового раздела, можно предположить, что испарение жидкости осуществляется главным образом в узкой зоне, распространяющейся по мере сушки в глубь материала и разделяющей области, занятые паром и жидкостью. В случае предварительного измельчения частиц растительной биомассы путем ударно-сдвиговых деформаций в молотковых или других дробилках происходит разрушение пор и клеток на микро и макроуровне, что обеспечивает свободный выход парообразной фазы из пор частицы. Ширина зоны испарения определяется характерным размером клеток, капиллярными силами, вызывающими перераспределение жидкости в порах разных размеров, а также соотношением между теплом, затрачиваемым на нагрев тела и жидкости во «влажной» области, и теплом, идущим на испарение. При сушке биомассы и торфа ширина зоны испарения оказывается значительно меньше характерного размера высушиваемого тела, так что эту зону можно заменить фронтом испарения пренебрежимо малой толщины. Анализ формы частиц после измельчения показал, что для торфа модельное тело имеет сферическую форму, для растительной и древесной биомассы цилиндрическую форму [5].

Основной материал. Рассмотрим сушку сферической частицы или цилиндрической (в случае биомассы) радиуса R , в которой сформировался фронт испарения $\xi=\mathrm{f}(\tau)$ (рис. 1 ). Предположим, что при углублении фронта испарения материал делится на две области "сухую" и "влажную". В сухой области перемещается только пар, во влажной влагосодержание остается неизменным и равно начальному. Градиент температуры во влажной области отсутствует, т.е. частица прогрета равномерно до температуры фазового перехода. По мере высыхания в сухой области $\xi(\tau) \leq \mathrm{r} \leq \mathrm{R}$ формируется распределение температур описываемое законами теплопроводности.


1-сухая область; 2-влажная область

## Рис.1. Распространение фронта испарения в сферической или цилиндрической частице

Изменение температуры в сухой зоне $\xi(\tau)<\mathrm{r}<\mathrm{R}$ для сферических в частиц, в случае сушки торфа, описывается уравнением теплопроводности для сферического тела:

$$
\begin{equation*}
a \cdot\left(\frac{\mathrm{~d}^{2} \mathrm{~T}}{\mathrm{dr}^{2}}+\frac{2}{\mathrm{r}} \frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dr}}\right)=\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{~d} \tau} \tag{1}
\end{equation*}
$$

Для случая сушки растительной биомассы изменение температуры описывается уравнением теплопроводности для цилиндрического тела:

$$
\begin{equation*}
a \cdot\left(\frac{\mathrm{~d}^{2} \mathrm{~T}}{\mathrm{dr}^{2}}+\frac{1}{\mathrm{r}} \frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dr}}\right)=\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{~d} \tau} . \tag{2}
\end{equation*}
$$

С граничными условиями 3 рода на поверхности частицы:

$$
\begin{equation*}
\left.\lambda \frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dr}}\right|_{\mathrm{r}=\mathrm{R}}=\alpha\left(\mathrm{T}_{c p}-\mathrm{T}(\mathrm{R})\right) \tag{3}
\end{equation*}
$$

И первого рода на границе фронта испарения:

$$
\begin{equation*}
\left.\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dr}}\right|_{\mathrm{r}=\xi(\tau)}=0 . \tag{4}
\end{equation*}
$$

Скорость продвижения границы сухой зоны определяется из уравнения баланса тепла и влаги на границе фронта испарения или еще называют условием Стефана на фронте фазового перехода:

$$
\begin{equation*}
\left.\lambda \frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dr}}\right|_{\mathrm{r}=\xi(\tau)}=\mathrm{L} \cdot \mathrm{U}_{0} \cdot \rho_{c y x} \frac{\mathrm{~d} \xi(\tau)}{\mathrm{d} \tau} \tag{5}
\end{equation*}
$$

где $\lambda$ - эффективный коэффициент теплопроводности, учитывающий явления термодифузии, конвективные токи в порах, теплоперенос парами воды, $\mathrm{U}_{0}$ - начальное влагосодержание сырья, Rрадиус частиц сырья, L - скрытая теплота парообразования.

Аналитическое решение модели найти достаточно сложно, поэтому приходится применять приближенные методы. Один из наиболее распространенных в инженерной практике методов, позволяющий получить решения предложен в 1931г. Л.С.Лейбензоном. Идея этого метода заключается в замене реального распределения температуры распределением, удовлетворяющим уравнению Лапласа (по этой причине данный метод иногда называют квазистационарным), а после нахождения температурного поля скорость движения фронта определяется с помощью условия Стефана.

Рассмотрим возможность решения математической модели высокотемпературной сушки частиц сферической формы. Пренебрегая периодом прогрева предполагаем, что в некоторый момент времени на поверхности сферической частицы устанавливается температура $T(R)>T \phi$. Фронт испарения начинает двигаться от поверхности к центру частицы. Пропорционально продвижению фронта будет изменятся средняя влажность частицы. Закон изменения влажности частицы можно найти из следующего равенства:

$$
\begin{equation*}
\mathrm{U}(\tau)=\frac{\mathrm{m}_{\varepsilon \pi}}{\mathrm{m}_{c y x}}=\frac{\rho_{c y x} \mathrm{U}_{0} \frac{4}{3} \pi \xi^{3}}{\rho_{c y x} \frac{4}{3} \pi \mathrm{R}^{3}}=\frac{\mathrm{U}_{0} \xi^{3}}{\mathrm{R}^{3}}, \tag{6}
\end{equation*}
$$

где $\mathrm{m}_{в л}$, $\mathrm{m}_{c y x}$ - масса влаги и сухого материала частицы, $\rho_{c y x}$ - плотность сухого материала частицы.
Температуру влажной части считаем всюду постоянной и равной $T_{\phi}$, соответственно градиент температуры, а вместе с ним и тепловой поток во влажной зоне равны нулю. Будем решать задачу квазистационарным методом Лейбензона. Положим в уравнении $\partial \mathrm{T} / \partial \tau=0$, тогда распределение температуры в области $\xi(\tau)<\mathrm{r}<\mathrm{R}$ будет равно:

$$
\begin{equation*}
\mathrm{T}(\mathrm{r})=C_{2}-\frac{C_{1}}{\mathrm{r}}, \tag{7}
\end{equation*}
$$

Константы интегрирования $\mathrm{C}_{1}$ и $\mathrm{C}_{2}$ определяются из граничных условий:

$$
\left.\begin{array}{c}
\left.\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dr}}\right|_{\mathrm{r}=\mathrm{R}}=\frac{\alpha}{\lambda}\left(\mathrm{T}_{c p}-\mathrm{T}(\mathrm{R})\right)=\frac{C_{1}}{\mathrm{R}^{2}} \\
\mathrm{~T}(\mathrm{R})=C_{2}-\frac{C_{1}}{\mathrm{R}^{2}}  \tag{9}\\
\mathrm{~T}(\xi(\tau))=\mathrm{T} \phi=C_{2}-\frac{C_{1}}{\xi(\tau)}
\end{array}\right\}=\mathrm{T}(\mathrm{R})=\mathrm{T} \phi+\frac{C_{1}}{\xi(\tau)}-\frac{C_{1}}{\mathrm{R}} .
$$

Решая совместно выражения (8) и (9) получаем выражение (10) для константы $\mathrm{C}_{1}$.

$$
\begin{equation*}
C_{1}=\frac{\mathrm{Tcp}-T \phi}{\frac{1}{\mathrm{R}}-\frac{1}{\mathrm{Bi} \cdot \mathrm{R}}-\frac{1}{\xi(\tau)}} . \tag{10}
\end{equation*}
$$

Подставляя в условие Стефана выражение (10) получаем дифференциальное уравнение распределение температуры в сухой области относительно координаты фронта испарения $\xi(\tau)$.

Таким образом, стационарное распределение температуры сухой области имеет вид:

$$
\begin{equation*}
\left.\lambda \frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dr}}\right|_{\mathrm{r}=\xi(\tau)}=\frac{C_{1}}{\xi(\tau)^{2}}=\frac{1}{\xi(\tau)^{2}} \frac{\mathrm{~T} C-T \phi}{\frac{1}{\mathrm{R}}-\frac{1}{\mathrm{Bi} \cdot \mathrm{R}}-\frac{1}{\xi(\tau)}}=\mathrm{L} \cdot \mathrm{U}_{0} \cdot \rho \frac{\mathrm{~d} \xi(\tau)}{\mathrm{d} \tau} . \tag{11}
\end{equation*}
$$

Разделяем переменные и проводим интегрирование правой части в пределах координат перемещения фронта испарения от R до $\xi$, а левой части в пределах от начала времени сушки до ее окончания.

$$
\begin{equation*}
\int_{0}^{\tau} \frac{(\mathrm{T} c p-T \phi) \lambda \cdot \mathrm{d} \tau}{\mathrm{~L} \cdot \mathrm{U}_{0} \cdot \rho}=\int_{\mathrm{R}}^{\xi} \xi(\tau)^{2}\left(\frac{1}{\mathrm{R}}-\frac{1}{\mathrm{Bi} \cdot \mathrm{R}}-\frac{1}{\xi(\tau)}\right) \mathrm{d} \xi(\tau) . \tag{12}
\end{equation*}
$$

После интегрирования получено уравнение описывающее зависимость изменения координаты перемещения фронта испарения во времени:

$$
\begin{equation*}
\frac{(\mathrm{T} c p-T \phi) \lambda \cdot \tau}{\mathrm{L} \cdot \mathrm{U}_{0} \cdot \rho}=\left(\frac{\varepsilon^{3}}{3 \mathrm{R}}-\frac{\varepsilon^{3}}{3 \mathrm{Bi} \cdot \mathrm{R}}-\frac{\varepsilon^{2}}{2}\right)-\left(\frac{\mathrm{R}^{3}}{3 \mathrm{R}}-\frac{\mathrm{R}^{3}}{3 \mathrm{Bi} \cdot \mathrm{R}}-\frac{\mathrm{R}^{2}}{2}\right) . \tag{13}
\end{equation*}
$$

В процессе обезвоживания доля влаги будет убывать по мере перемещения фронта испарения к центру частицы. Изменение влагосодержания частиц U может быть определено из зависимости (6)

Выразим координату $\xi$ через изменение влагосодержания частицы в процессе сушки:

$$
\begin{equation*}
\xi=\mathrm{R} \cdot \sqrt[3]{\frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_{0}}} \tag{14}
\end{equation*}
$$

Подставим выражение (14) в уравнение (13) и получим зависимость времени сушки от изменения влагосодержания сферической частицы:

$$
\begin{equation*}
\tau=\frac{\mathrm{L} \cdot \mathrm{U}_{0} \cdot \rho \cdot \mathrm{R}^{2}}{(\mathrm{~T} c p-T \phi) \lambda}\left(\frac{\mathrm{U}}{3 \mathrm{U}_{0}}-\frac{1}{3 \mathrm{Bi}} \frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_{0}}-\frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_{0}}\right)^{\frac{2}{3}}+\frac{1}{6}+\frac{1}{3 \mathrm{Bi}}\right) . \tag{15}
\end{equation*}
$$

Аналогично можно получить расчетное уравнение для случая сушки цилиндрической частицы:

$$
\begin{equation*}
\tau=\frac{\mathrm{L} \cdot \mathrm{U}_{0} \cdot \rho \cdot \mathrm{R}^{2}}{(\mathrm{~T} c p-T \phi) \lambda}\left(\frac{1}{4}+\frac{1}{2 \mathrm{Bi}}-\left(\frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_{0}}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot\left(\frac{1}{2 \mathrm{Bi}}+\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\mathrm{U}_{0}}{\mathrm{U}}\right)^{\frac{1}{3}}+\frac{1}{4}\right)\right) . \tag{16}
\end{equation*}
$$

Наиболее адекватно данные уравнения описывают условия сушки, когда средняя скорость движения фронта испарения не превышает скорость установления стационарного распределения температуры в сухой зоне. Если R - определяющий размер, то $\mathrm{R}^{2} /$ а - характерное время установления температуры в сухой области. Соответственно, условие применимости данной модели имеет вид:

$$
\begin{equation*}
\mathrm{a}_{1} \geq \frac{\mathrm{R}^{2}}{\tau} \text { или }(\mathrm{T} c p-T \phi) \leq \frac{\mathrm{L} \cdot \mathrm{U}_{0}}{\mathrm{c}} \cdot A \text {, } \tag{17}
\end{equation*}
$$

где для сушки сферических частиц торфа $A=\frac{\mathrm{U}}{3 \mathrm{U}_{0}}-\frac{1}{3 \mathrm{Bi}} \frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_{0}}-\frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_{0}}\right)^{\frac{2}{3}}+\frac{1}{6}+\frac{1}{3 \mathrm{Bi}}$,
для сушки цилиндрических частиц биомассы $A=\frac{1}{4}+\frac{1}{2 \mathrm{Bi}}-\left(\frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_{0}}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot\left(\frac{1}{2 \mathrm{Bi}}+\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\mathrm{U}_{0}}{\mathrm{U}}\right)^{\frac{1}{3}}+\frac{1}{4}\right)$, cтеплоемкость сухой области частицы, Дж/кг•К.

При температурах сушильного агента от $100^{\circ} \mathrm{C}$ до $400^{\circ} \mathrm{C}$ для большинства видов биомассы и торфа при размере частиц до 6 мм параметр А находится в диапазоне $0,5-0,1$, соответственно величины температуропроводности и отношения $\frac{\mathrm{R}^{2}}{\tau}$ будут одного порядка, что является достаточным условием применения данной методики для инженерных расчетов высокотемпературных процессов сушки биомассы и торфа в технологиях переработки биомассы на топливо.

Предложенная математическая модель учитывает наиболее характерные стороны процесса высокотемпературной сушки частиц. Ряд допущений и неучтенные факторы, такие как отсутствие стадии прогрева, отклонения формы частиц от сферической или цилиндрической, отсутствие усадки расплывания фронта испарения, неустановившийся стационарный режим распределения температур в сухой области и т. д., в реальных условиях вносят в результаты теоретических расчетов определенную погрешность.

Для проверки адекватности математической модели были проведены лабораторные исследования процесса сушки частиц торфа и древесины размером $4,5-5$ мм с исходным влагосодержанием $1,1-1,2$ кг/кг с.в. на специализированном стенде исследования процессов тепломассобмена при сушке растительных материалов Института технической теплофизики НАН Украины. Частицы заданного размера вводились в сушильную камеру. Температура сушильного агента составила 120 С и $140{ }^{\circ} \mathrm{C}$. Скорость сушильного агента в камере $3 \mathrm{~m} /$ с. Снималась кинетика обезвоживания монослоя частиц сырья $\mathrm{U}=\mathrm{f}(\tau)$. Результаты расчета процесса обезвоживания (показано маркером) и экспериментальные данные (сплошная линия) приведены на (рис. 2). Среднестатистическое отклонение экспериментальных и расчетных значений составило не более $3 \%$. При расчете времени обезвоживания использовались

## Одеська національна академія харчових технологій МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ

методики расчета теплообмена предложенные в [3] Достаточно высокая сходимость результатов наблюдалась при использовании в расчетах для торфа эффективного коэффициента теплопроводности в пределах $0,1-0,11 \mathrm{Bт} / \mathbf{m} \cdot К$, для древесины $0,12-0,2$. Вт/м•К. При расчетах следует уделять внимание коэффициенту формы частиц, влияние которого на величину коэффициента теплоотдачи в данной работе не исследовали.

Как видно из экспериментальных данных, участок прогрева не превышает $1 \%$ времени сушки. Заниженные по сравнению с табличными коэффициенты теплопроводности [6,7] для биомассы и торфа свидетельствуют о наявности внутренних фильтрационных явлений сопровождающихся термодифузией, а так же влиянием на процесс осмотических и адсорбционных сил, замедляющих процесс сушки.

a)


1-при температуре сушильного агента $140{ }^{\circ} \mathrm{C}, 2$ - при температуре сушильного агента $120^{\circ} \mathrm{C}$. Сплошная линия- результатьь эксперимента, маркер- результатьь расчета.

Рис.2. Изменение влагосодержания при сушке частиц торфа(а) и частиц энергетической ивы (б)
На основании проведенных исследований можно сделать вывод о справедливости основных допущений положенных в основу предлагаемой математической модели.

Выводы. В результате проведенных исследований разработана модель сушки частиц биомассы и торфа высокотемпературным теплоносителем. Среднестатистическое отклонение экспериментальных и расчетных значений не более $3 \%$, что позволяет сделать вывод о достаточной точности описания процесса сушки данной моделью и возможности ее применения для разработки инженерных методик расчета и оптимизации режимов работы сушильного оборудования технологий производства твердых биотоплив.

## Література

1. Коринчук, Д. Н. Выбор сушильной установки мобильного комплекса производства топливных брикетов и гранул из биомассы [Текст] / Д. Н. Коринчук // Вісник НТУУ «КПІ» «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». - 2011. - № 2(8). - С. 37 - 42.
2. Снежкин, Ю. Ф. Модель высокотемпературной сушки сферических торфяных частиц и ее экспериментальное подтверждение [Текст] / Ю.Ф. Снежкин, Д.Н. Коринчук // Промышленная теплотехника. - 2004. - Т. 26, № 6. - С. 134-137.
3. Муштаев, В. И. Сушка дисперсных материалов [Текст] / В. И. Муштаев. - М.: Химия, 1988. - 352 с.
4. Долинский, А. А. Кинетика и технология сушки распылением [Текст] /А. А., Долинский, К. Д. Малецкая, В.В. Шморгун. - К.: Наук. Думка, 1987. - 221 с.
5. Корінчук, Д. М. Фізична модель високотемпературного сушіння біомаси і торфу / Д. М. Корінчук, М. М. Безгін, М. А. Пашенько // Збірник наукових статей «XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Вдосконалення процесів і обладнання харчових і хімічних виробництв» ОНАХТ /Miн. Освіти і науки України. - Одеса: ОНАХТ, 2016. - С. 125-128.
6. Гнєушев, В. О. Брикетування торфу [Текст] / В. О. Гнеушев - Рівне: НУВГП, 2010. - 166 с.

## УДК: 628.16.045.5-047.58:628.165

Безбах И. В., Кепин Н. И ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЭКСТРАКЦИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ Недбайло А. Є. ..... 285
КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ
Тришин Ф. А., Терзиев С. Г., Орловская Ю. В ..... 289
МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ
ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОНВЕКТИВНО - ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО СУШІННЯ
Малежик І. Ф., Бурлака Т. В., Дубковецький І. В., Деканський В. Є. ..... 296
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОМІРЧАСТОЇ МОДЕЛІ ІЗ ЗВОРОТНИМИ ПОТОКАМИ В ВІБРОЕКСТРАКТОРАХ
Мисюра Т. Г., Зав’ялов В. Л., Лобок О. П., Попова Н. В., Запорожець Ю. В. ..........................
МОДЕЛЮВАННЯ $\quad$ ПРОЦЕСІВ ІННОВАЦІЙНИХ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІІ ПОЛІМЕРІВ
Бухкало С. I. ..... 309
ДОСВІД РОЗРОБКИ КОМП’ЮТЕРНО - ІНТЕГРОВАНОГО СТЕНДУ ДЛЯ СУПРОВОДУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ МІКРОХВИЛЬОВОГО-ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ
Яровий I. I. ..... 313
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО КЛАСТЕРА В ПРОЦЕСАХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ
Иваницкий Г. К. ..... 319
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭКСТРАКТА СТЕВИИ В МИКРОВОЛНОВОМ ВАУУМ-ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ
Бурдо О. Г., Ружицкая Н. В., Резниченко Т. А., Резниченко Д. Н. ..... 322
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ КОМПОЗИЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕН - КАУЧУК
Гоцький Я. Г., Двойнос Я. Г ..... 327
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
Бурдо О. Г., Давар Ростами Пур ..... 335
ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОНАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ПІКОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ Остапенко О. П. ..... 331
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФА И БИОМАССЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВ
Снежкин Ю. Ф., Коринчук Д. Н. ..... 337
ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ БЛОКА ЛЬДА Тришин Ф. А., Трач А. Р. ..... 343
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
Бурдо О. Г., Давар Ростами Пур, Масельская Я. А ..... 347
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКИ
Бурдо О. Г., Маренченко Е. И., Пилипенко Е. А., Балагура В. В ..... 355
АНАЛІЗ ОПОРІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ РЕЧОВИНИ ЧЕРЕЗ МЕМБРАНУ ПРИ НАНОФІЛЬРАЦІЇ ТА 3ВОРОТНОМУ ОСМОСІ
Гулієнко С. В. ..... 364
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТИТЕЧІЙНОГО ЕКСТРАКТОРА 3 ПДДВОДОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГЇ
Левтринська Ю. О., Зиков А. В., Терзієв С. Г ..... 367
К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ КАПЕЛЬ ХЛАДАГЕНТА В ФИЛЬТРЕ ЭЖЕКТОРЕ
Когут В. Е., Бушманов В., Хмельнюк М. Г. ..... 374

