

УДК 66. 047. 7, 66.047.3

Проведено дослідження тепло-масообмінних процесів, які дозволяють прискорити процес видалення вологи з гетерогенних матеріалів залежно від режимних параметрів термовакуумних сушильних установок. Показано, що найбільш ефективним способом обезводнення матеріалів - є термовакуумний, що підкреслює перспективність даного напрямку

Ключові слова: термовакуумна сушильна установка, гетерогенні матеріали, тепло - і масообмінний процес, енергозбереження

Проведены исследования тепло-массообменных процессов, которые позволяют ускорить процесс удаления влаги из гетерогенных материалов в зависимости от режимных параметров термовакуумных сушильных установок. Показано, что наиболее эффективным способом обезвоживания материалов является термовакуумный, что подчеркивает перспективность данного направления

Ключевые слова: термовакуумная сушильная установка, гетерогенные материалы, тепло- и массообменный процесс, энергосбережение

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. Кутовой

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Национальный научный центр «Харьковский
физико-технический институт», НАН Украины
ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108

1. Введение

Одним из перспективных направлений современного подхода к эффективному использованию природных и энергетических ресурсов является реализация концепций по интенсификации и оптимизации процессов теплообмена при удалении влаги из гетерогенных материалов [1]. В настоящее время ведутся разработки по созданию новых эффективных, энергосберегающих термотехнологических установок, совершенствуются методы интенсификации технологических процессов с целью повышения эффективности теплотехнического оборудования [2]. Среди теплотехнологических установок есть сушильные, которые используются в различных отраслях промышленного производства для получения новых материалов и удаления влаги из гетерогенных материалов. Существующие сушильные установки в большинстве случаев дорогие, громоздкие, металлоемкие, потребляют много энергии. Процессы сушки гетерогенных материалов в них происходят при высоких температурах и атмосферном давлении. Решение проблемы энергосбережения в рамках ограниченности энергоресурсов, на данном этапе развития промышленного производства, является более широкое использование электрической энергии в теплотехнологических процессах. Эффективное использование электрической энергии требует разработки новых способов сушки и конструкций нагревательных элементов.

Целью данной работы является разработка энергосберегающих процессов термовакуумной сушки гетерогенных материалов.

2. Цель и задачи исследования

Повышение эффективности процессов сушки главным образом связано с необходимостью комплексного решения теоретических и прикладных задач теплофизической и термодинамической направленности с внедрением в производство новых современных термотехнологических установок и энергосберегающих технологий. Таким образом актуальной проблемой является создание новых установок с улучшенными эксплуатационными и технико - экономическими характеристиками для интенсификации теплообменных процессов, которые позволят эффективно подводить тепло к высушиваемому материалу, ускорят процесс тепло - и массообмена во влажном материале, сократят время сушки [3].

Скорость сушки гетерогенных материалов зависит от коэффициента теплопередачи от нагревателя к высушиваемому материалу, мощности источника тепла, площади испарения, разности давлений окружающей среды и давления в теле высушиваемого материала, производительности вакуумного насоса.

Суммарный тепловой поток Q , который выделяет нагревательный элемент для сушки, составляет:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (1)$$

где - $Q_{1,2,3,4}$ - тепловая энергия, которая используется на нагревание: сухого материала, влаги, деталей и узлов сушильной установки, испарение влаги, Дж; Q_5 - количество тепловой энергии, которая уходит в окружающее пространство, Дж;

Таким образом, электрическая мощность нагревателя должна за определенный промежуток времени обеспечить нагревание сухого сырья, влаги, деталей и узлов сушильной установки, превратить влагу в пар и скомпенсировать ту часть тепла, которая уходит в окружающее пространство [4].

$$P_h = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5}{\tau} = \frac{1}{\tau} \{c_1 m_c (T_2 - T_1) + c_2 m_B (T_2 - T_1) + c_3 m_M (T_2 - T_1) + c_4 m_2 + Q_5\}, \quad (2)$$

где c_1, c_2, c_3 – теплоемкость: сухого вещества, влаги, материала из которого изготовлена сушильная установка, Дж/(кг К); c_4 – удельная теплота парообразования Дж/кг; τ – время работы установки, с; m_1, m_2, m_3 – масса: сухого вещества, влаги, материала из которого изготовлена термовакuumная установка, кг; T_1, T_2 – начальная и конечная температура нагревания, К.

Из выражения (2) следует, что для уменьшения энергопотребления сушильной установкой необходимо нагревательный элемент теплоизолировать, чтобы как можно меньше тепловой энергии излучалось в окружающее пространство, т. е. $Q_5 \rightarrow 0$.

Установку нужно изготавливать из материала с низкой теплоемкостью, а также необходимо уменьшать массу сушильной камеры. Следует своевременно удалять пар из сушильной камеры. По мере удаления влаги из высушиваемого образца необходимо снижать мощности нагревательного элемента. Для интенсификации сушки влажных материалов необходимо эффективно подводить тепловую энергию к высушиваемому материалу.

Процесс сушки гетерогенных материалов состоит из нескольких основных этапов. На первом этапе процесс сушки характерен интенсивным изменением влагосодержания материала во времени. Этот этап изменения влажности отражает тот факт, что влага, испаряющаяся с поверхности, непрерывно заменяется новой, поступающей из внутренних слоев. Таким образом, процесс сушки в первом периоде эквивалентен испарению жидкости со свободной поверхности и определяется лишь внешними факторами, т. е. температурой нагревания высушиваемого материала, скоростью испарения и влагосодержанием окружающего пространства. По мере уменьшения влажности в высушиваемом материале наступает момент, когда скорость подачи влаги к поверхности оказывается недостаточной, чтобы обеспечить прежнюю скорость испарения с поверхности, вследствие чего скорость сушки снижается. Снижение скорости сушки при неизменных условиях испарения на поверхности материала зависит, главным образом, от изменения структуры материала [5] и высушенного поверхностного слоя. Перемещение влаги внутри материала происходит по закону, аналогичному закону теплопроводности [6] и, общий поток влаги внутри материала может быть выражен равенствами:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = K_{11} \nabla^2 U + K_{12} \nabla^2 T + K_{13} \nabla^2 P, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = K_{21} \nabla^2 U + K_{22} \nabla^2 T + K_{23} \nabla^2 P, \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = K_{31} \nabla^2 U + K_{32} \nabla^2 T + K_{33} \nabla^2 P. \quad (5)$$

Из данных выражений следует, для интенсификации процесса сушки влажных материалов необходимо ускорить процесс тепло- и массообмена во влажном материале. Перемещение влаги из высушиваемого материала к его поверхности зависит от коэффициентов: диффузии влаги, термодиффузии, молярного переноса – K_{ij} ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$); градиента влажности, температуры, давления – $\nabla U, \nabla T, \nabla P$.

Анализируя уравнения (3) – (5), можно выявить пути интенсификации процесса сушки гетерогенных сред:

- а) увеличением разности давлений насыщенного пара у поверхности испарения и парциального давления пара в окружающей среде – ΔP . Иными словами, по существу, следует применять вакуумную сушку;
- б) увеличением площади поверхности испарения;
- в) повышения температуры нагревания тела высушиваемого материала.

Повышение температуры не всегда приемлемо, так как большое количество высушиваемых материалов при этом теряет свои свойства. Разнообразные требования к свойствам высушенных материалов обуславливают наличие целого ряда технологических методов их получения.

Выбор оптимальных рабочих параметров в термовакуумных сушильной установке является определяющим. При термовакuumной сушке энергозатраты расходуются на нагревание влаги, превращения влаги в пар и откачки пара из объема вакуумным насосом [7]. Теоретические исследования по определению энергозатрат на выход пара из открытой поверхности воды показали, что поток молекул воды J с единицы поверхности в термовакuumной установке при температуре окружающей среды T_0 будет зависеть от подведенного тепла Q ; теплоты парообразования q ; теплоемкости влаги C_2 .

$$J = \frac{Q_0}{q} \left(1 - \frac{C_2 T_0^2}{q^2} \ln \frac{n}{n_h(T_0)} \right). \quad (6)$$

Второй член в скобках выражения (6) есть часть тепловой энергии, которая идет на испарение воды и определяется производительностью вакуумного насоса и нагревательного элемента. Отсюда видно, что при

$\frac{n}{n_h(T_0)} < 1$ доминирует работа насоса и охлаждается система. При $\frac{n}{n_h(T_0)} > 1$ доминирует нагреватель, происходит нагревание системы.

В обоих случаях имеются дополнительные энергозатраты. Минимальные энергозатраты на испарение воды будут тогда, когда

выполняется условие $\frac{n}{n_h(T_0)} \cong 1$.

Здесь n – плотность пара в вакуумной камере; $n_h(T_0)$ – плотность насыщенного пара при температуре окружающей среды.

Проведенные исследования кинетики термовакuumной сушки влажного сырья с целью установления

минимальных энергетических затрат при оптимальном технологическом режиме показали, что минимальные энергетические затраты в процессе сушки определяется условием равновесия между испарением влаги с поверхности высушиваемого материала и отвода водяного пара из вакуумного объема.

3. Анализ публикаций и исследований

Термовакuumная сушка является эффективным способом освобождения гетерогенных материалов от влаги. Например, при атмосферном давлении и температуре среды 313 К один килограмм воздуха может испарить 50 г влаги. При давлении среды 8 кПа при тех же параметрах 1 кг воздуха уже испарит 7,4 кг влаги, т. е. способность вакуумной среды испарять влагу значительно выше, чем среды при атмосферном давлении [8]. В вакууме вода испаряется при температуре, которая существенно ниже температуры парообразования при атмосферном давлении. Это практически исключает перегрев сырья и порчу продукта вследствие, например, деструкции витаминов в биологических продуктах или термической денатурации белков в семенах растений. Именно с высокой температурой воздействия на высушиваемый материал связаны основные негативные составляющие технологии сушки влажных материалов при атмосферном давлении. Так, при сушке зерна перегрев приводит к тому, что зерно становится непригодным для получения муки, не говоря уж о семенном зерне, которое после некачественной сушки становится фуражным. При сушке медицинских и биопрепаратов перегрев сушильного агента и вовсе приводит к их химическому разложению.

Термовакuumная сушка различных как органических, так и неорганических материалов, является во многих случаях одним из важных звеньев технологического процесса. Выбор оптимальных режимов процесса сушки является определяющим для многих влажных материалов. Основной характеристикой рассматриваемого процесса является скорость сушки, которая определяется условием равновесия между процессами испарения влаги с поверхности продукта и отвода водяных паров от поверхности продукта посредством вакуумного насоса. Специфика термовакuumной сушки при температурах выше 273 К заключается в том, что свободная влага в порах материала во время сушки находится в жидком и частично в парообразном состоянии, поэтому реальная скорость сушки в значительной мере контролируется динамикой влагопереноса. Парообразование в глубинных слоях материала обуславливает появление в нем градиента давления, а сравнительно низкая теплопроводность жидкости и особенно пара приводит к возникновению градиента температуры. С понижением давления в вакуумной камере внутри тела высушиваемого материала увеличивается скорость переноса влаги из глубины продукта на его поверхность. Скорость испарения в вакууме выше, чем при атмосферном давлении. Образовавшийся пар диффундирует в окружающую среду. Коэффициент диффузии K_d испарения свободной воды с поверхности, зависит от давления в сушильной камере P_B температуры окружающей среды T_{oc} [9].

$$K_d = \frac{K_0 \left(\frac{T_{oc}}{273} \right)^{1,82} \cdot 10^5}{P_B}. \quad (9)$$

Чем выше температура нагревания и ниже давление в окружающем пространстве, тем интенсивнее испаряется влага. Удаление влаги из высушиваемого объекта зависит также от структуры высушиваемого материала (характера его капиллярно-пористой структуры).

Специфическая особенность ряда влажных материалов обусловлена их химическим составом или биологической природой, что ограничивает возможность применения повышенных температур нагревания материала в процессе сушки и вызывает необходимость тщательного выбора оптимального режима сушки с учетом термочувствительности высушиваемого продукта. Так, например, допустимая температура нагревания пищевых продуктов в основном определяется термочувствительностью белкового комплекса и должно быть ниже температуры денатурации белков.

Поэтому проводились экспериментальные исследования по низкотемпературной термовакuumной сушке, изучалось влияние давления и температуры на скорость сушки капиллярно-пористых материалов. Порция влажного материала загружалась в камеру, проводился предварительный нагрев до 313 К при давлении 664 Па. Периодически образец извлекался из камеры для взвешивания. После 20-й минуты сушки вес образца не изменялся. Результаты эксперимента приведены на рис. 1.

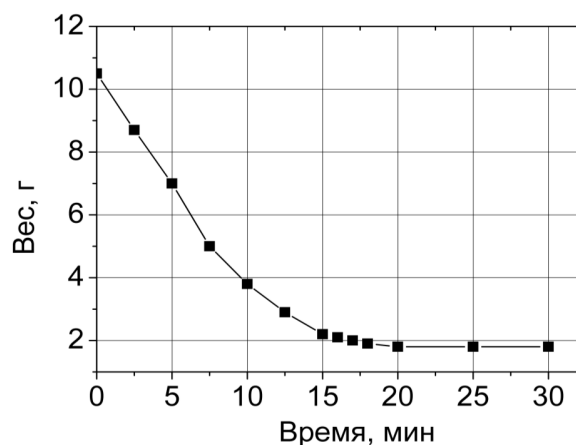


Рис. 1. Удаление влаги из исследуемого образца

Как видно из результатов исследования, основной процент свободной влаги из высушиваемого образца уходит впервые 10 минут, потом удаляется влага, которая находится в капиллярах и адсорбированная на стенках капилляров.

Экспериментально изучалась мощность теплового потока, излучаемого нагревательным элементом в процессе термовакuumной сушки при поддержании температуры образца не выше 313 К (рис. 2).

По мере удаления влаги из высушиваемого образца, потребность во внешнем тепловом потоке падала, соответственно уменьшалась мощность нагревательного элемента.

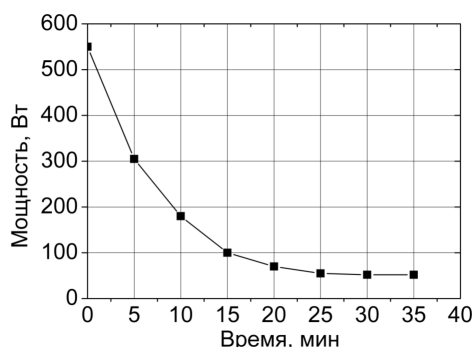


Рис. 2. Изменение мощности нагревательного элемента в процессе сушки

Из результатов исследования установлено, что мощность нагревательного элемента в конечном цикле сушки понизилась на порядок по сравнению с мощностью этого же нагревательного элемента в начальной стадии сушки. Это позволяет значительно экономить электроэнергию.

4. Экспериментальные исследования удаления влаги из капиллярно – пористого тела в термовакuumной установке

Рассмотрим зависимость потери влаги в образце ТПВФ-3, который имеет капиллярно – пористую структуру, от времени (рис. 3).

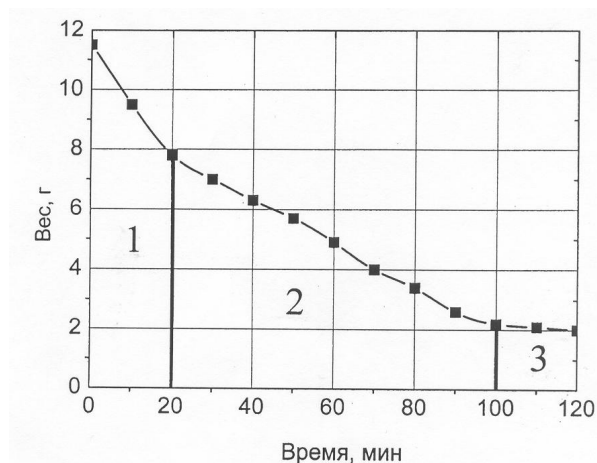


Рис. 3. Выход влаги из образца ТПВФ-3 во время сушки

Температура нагревания образца 323 К, давление в вакуумном объеме $4,0 \cdot 10^3$ Па. Максимальная масса сухого образца составляла 2 г. Влажность образца после пропитки его водой составила 83 %.

Процесс вакуумной сушки образца ТПВФ-3 можно разбить на три этапа.

- 1 этап, рис. 3, – испарение свободной влаги из высушиваемого образца в вакуумном объеме происходит согласно выражению (6).

- 2 этап, рис. 3, – удаление влаги из капилляров осуществляется согласно выражению [10].

$$J_k = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \cdot r \cdot \left(\frac{P_1 - P_2}{l} \right) \cdot n, \quad (10)$$

где J_k – плотность потока вещества, протекающего в единицу времени через единицу площади поперечного сечения капилляра $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$, P_1, P_2 – перепад давления на концах капилляра, Па; M – молекулярная масса пара, $\text{кг}/\text{моль}$; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$; r – радиус капилляра, м; l – длина капилляра, м; n – количество капилляров в высушиваемом образце.

- 3 этап, рис. 3, соответствует удалению влаги, адсорбированной на стенках капилляров. К этому этапу относится пленочное движение жидкости вдоль поверхности капилляра при наличии температурного градиента и давления. Экспериментально установлено, что на удаление влаги, адсорбированной на стенках капилляра при термовакuumной сушке, оказывает влияние наличие пленочного движения, коэффициент теплопередачи, градиент давления на концах капилляра, кинетическая вязкость, коэффициент поверхностного натяжения – второе слагаемое.

$$v_{пл} = \frac{H^2 (T_2 - T_1)}{l} \cdot n \cdot \left[\left(\frac{\epsilon}{2\rho_{ж} \cdot \eta_{ж}} \right) + \left(\frac{2P_H \cdot k_T}{P_c \cdot v \cdot \epsilon} \right) \right], \quad (11)$$

где v – скорость пленочного движения жидкости в капилляре, $\text{м}^2/\text{с}$; H – толщина пленки, м; ϵ – коэффи-

циент поверхностного натяжения, $\frac{\text{кг}}{\text{с}^2 \cdot \text{К}}$;

$\rho_{ж}$ – плотности жидкости, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\eta_{ж}$ – кинематическая вязкость жидкости, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$;

P_H – мощность нагревателя, Вт; k_T – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

P_c – среднее давление в капилляре, Па; v – кинетическая вязкость, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$. $P_c = \frac{P_1 - P_2}{2}$. P_1, P_2 – давление на концах капилляра, Па.

Если сушка капиллярно-пористого тела происходит при атмосферном давлении, то влага, адсорбированная на стенках капилляра, удаляется за счет нагревания образца – первое слагаемое выражения (11). Если удаление влаги из капиллярно-пористого тела при нагревании осуществляется в вакуумном объеме, то скорость пленочного движения жидкости в капилляре возрастает – второе слагаемое выражения (11).

Экспериментальные исследования вакуумной сушки на образце, изготовленном из материала ТПВФ-3, показали, что на первом этапе сушки идет интенсивное удаление свободной влаги из образца – это около 39 % от общей влаги. На втором этапе сушки выделяется влага, которая находится в капиллярах, – это около 54 % от общей влаги. Остальная влага – около 7 % – удаляется из образца на третьем этапе сушки – это та влага, которая адсорбировалась на стенках капилляров.

Для удаления свободной влаги из высушиваемого образца потребовалось 20 минут – это около 17 % от общего времени сушки. Для удаления влаги из ка-

пилляров потребовалось 70 минут – это около 58 % от общего времени. Для адсорбированной влаги на стенках капилляров потребовалось 30 минут – это около 25 % от общего времени.

Свободная влага удалялась из высушиваемого образца со скоростью 0,185 г/мин. Влага, которая находится в капиллярах, уходила из высушиваемого образца со скоростью 0,073 г/мин. Скорость удаления адсорбированной влаги соответствовала 0,023 г/мин. Из результатов эксперимента следует, медленнее всего удаляется влага, которая была адсорбированная на стенках капилляров.

В сушильном шкафу при атмосферном давлении образец (из материала ТПВФ-3) сушился 23 часа (рис. 4).

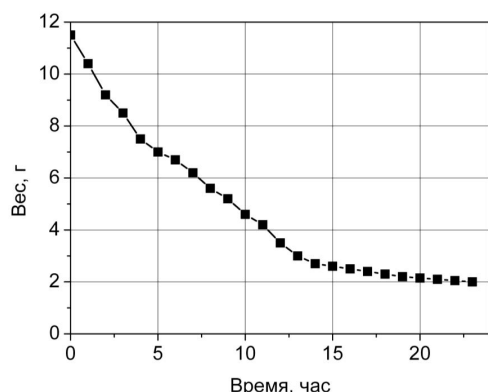


Рис. 4. Сушка ТПВФ-3 в сушильном шкафу

Скорость сушки в сушильном шкафу при атмосферном давлении в 11,5 раза медленнее, чем в вакууме.

Существенное влияние на эффективную тепло- и влагопроводность капиллярно-пористых систем предоставляет распределение капилляров пористого

тела по размерам (радиус, длина капилляра). Таким образом, скорость удаления влаги J_k при заданной разности давлений ΔP зависит от радиуса капилляров r и его длины l .

$$J_k = f(r, l). \quad (12)$$

Полный выход влаги из капилляров происходит в то время, когда наступит равновесие

$$Q(\tau) = \int \dot{Q} d\tau, \quad (13)$$

где Q - полное испарение с высушиваемого образца; $\dot{Q}$ - количество влаги, испаряющейся из всех высушиваемых образцов при поддерживаемом давлении P в вакуумном объеме и температуре T_0 .

5. Выводы

Анализ проведенных исследований показал, что наиболее эффективным способом обезвоживания различных материалов является термовакuumный, что подчеркивает актуальность данной темы, перспективность дальнейшего использования термовакuumных установок для удаления влаги из гетерогенных материалов. Полученные результаты исследований дают возможность создавать энергосберегающие, высокоэффективные, термовакuumные установки различного целевого назначения для сушки как неорганического, так и органического сырья. Эффективность процесса сушки в термовакuumных установках зависит от количества подведенного тепла к высушиваемому материалу, интенсивности перемещения влаги в нем и скорости отвода влаги из высушиваемого объекта. Все это можно осуществить путем применения новых методов физической обработки влажных материалов.

Литература

1. Долинский, А. А. К вопросу эксэргоекономической оптимизации энергетических систем [Текст] / А. А. Долинский // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, №4. – С. 105-108.
2. Шидловський, А. А. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії / під заг. ред. А. А. Шидловського. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. – С. 55-67.
3. Бурдо, О. Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах [Текст] / О. Г. Бурдо, Л. Г. Калинин. – Одесса, 2008. – 347 с.
4. Кутовой, В. А. Термовакuumный процесс получения нанодисперсных материалов целевого назначения [Текст] / В. А. Кутовой, А. С. Луценко // Энергосбережение энергетика энергоаудит. – 2013. – №3 (109). – С. 55-64.
5. Ковалевский, М. Ю. О механизмах релаксационных процессов термо-массопереноса в гетерогенных средах со структурой [Текст] / М. Ю. Ковалевский, В. А. Кутовой, Л. В. Логвинова // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. – 2012. – №1025. – Вып. 4 (56). – С. 10-16.
6. Лыков, А. В. Теплообмен [Текст] / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 309 с.
7. Слезов, В. В. К теории испарения воды при термовакuumной сушке [Текст] / В. В. Слезов, В. А. Кутовой, Л. И. Николайчук // Вакуумная техника и технология. – 2005. – Т. 15, №3. – С. 265-272.
8. Горяев, А. А. Вакуумно-диэлектрические сушильные камеры [Текст] / А. А. Горяев. – Москва: Лесная промышленность. – 1985. – С. 4-15.
9. Захаренко, В. А. Расчет скорости испарения воды с открытой поверхности в зависимости от условий ее нахождения при вакуумно-тепловой сушке [Текст] / В. А. Захаренко, П. Л. Пахомов, Ю. Р. Князев, А. Н. Богдан // ВАНТ. Серия "Вакуум, чистые материалы, сверхпроводник". – 2002. – №1. (12). – С. 62-63.
10. Лыков, А. В. Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков. – Москва: Энергия, 1968. – 456 с.