

14. Бурдо О.Г., Рыбина О.Б. Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле – Одесса: Полиграф, 2010 – 200с.
15. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Электромагнитные технологии обезвоживания сырья /Problemele energeticii regionale, Chisinau, №1 (18), 2012.- pp.69- 79.
16. Burdo O.G., Kovalenko E.A., Kharenko D.A. Intensification of processes of low-temperature separation of food solutions /Applied Thermal Engineering, № 28 2008. - pp. 311- 316.
17. Бурдо О.Г., Миличук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294с.

УДК 536.755:021.1.016

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА СУШКИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПРОДУКТА ПОЛУЧЕНИЯ КАТАЛИЗАТОРА ГИАП

**Рудобашта С.П., д-р техн. наук, профессор, *Кошелева М.К., канд. техн. наук, профессор
Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина, г. Москва
*Московский государственный университет дизайна и технологии, г. Москва**

Исследованы кинетические закономерности процесса сушки типичного капиллярно-пористого материала: промежуточного продукта получения катализатора ГИАП. Получено аналитическое решение для оценки продолжительности стадии прогрева при исследовании массопроводности при сушке. Проведены экспериментальные исследования динамики процесса сушки, на основе которых показано единство механизма массопереноса в данном материале при температуре сушки как ниже, так и выше 100 °С. Разработаны рекомендации по выбору и кинетическому расчету промышленного аппарата.

Kinetic regularities of the drying process of a typical capillary-porous material: the intermediate product for producing a catalyst GIAP. An analytical solution for estimating the duration of the heating step in the study of mass conductivity at drying. Experimental studies of the dynamics of the drying process on the basis of which shows the unity of the mechanism of mass transfer in this material at a drying temperature both below and above 100 °C. The recommendations for the selection and kinetic calculation of industrial apparatus.

Досліджено кінетичні закономірності процесу сушіння типового капілярно-пористого матеріалу: проміжного продукту отримання катализатора ГИАП. Отримано аналітичне рішення для оцінки тривалості стадії прогріву при дослідженні массопроводності при сушінні. Проведено експериментальні дослідження динаміки процесу сушіння, на основі яких показано єдність механізму масопереносу в даному матеріалі при температурі сушіння як нижче, так і вище 100 °С. Розроблено рекомендації щодо вибору та кінетичного розрахунку промислового апарату.

Ключевые слова: капиллярно-пористый материал, кинетика и динамика сушки, массопроводность, интенсификация.

Целью работы является исследование кинетических закономерностей процесса сушки типичного капиллярно-пористого материала: промежуточного продукта получения никелевого катализатора ГИАП, (ПППК ГИАП), разработка рекомендаций по организации промышленного процесса сушки.

Для практического применения зонального метода расчета кинетики процесса сушки [1,3,7] необходимо знание функции взаимосвязи между среднеобъемными температурой и влагосодержанием материала, а также данные по массопроводности, массоотдаче и динамическому равновесию в системе, анализ свойств материала как объекта сушки.

При экспериментальном исследовании массопроводных свойств высушиваемых материалов использовались образцы в форме стержней с влагоизолированной боковой поверхностью, с торцов которых происходит испарение влаги [1, 2, 6]. Образцы предварительно термостатировались при температуре опыта, но в момент перемещения их из термостата в сушильную камеру и при последующем испарении влаги с торцевых поверхностей, происходило некоторое понижение температуры. Однако, благодаря интенсивному теплопритоку через влагоизолированную поверхность, образец довольно быстро прогревался и, начиная с некоторого момента времени, его среднеобъемная температура становилась близкой к температуре среды.

Для выделения на кривой сушки изотермического (с заданной погрешностью) участка необходима расчетная зависимость, по которой можно оценивать время наступления изотермической стадии. Анали-

тическая проверка условий прогрева стержней с теплоизолированной боковой поверхностью показала практическую применимость зонального метода исследования массопроводных свойств на определяющем по длительности интервале процесса сушки исследуемого материала. Для этого была рассмотрена краевая задача, описывающая процесс нагревания при конвективном теплообмене стержня, который имеет размеры:

$$-R \leq x \leq R; -R \leq y \leq R; -l \leq z \leq l;$$

Плотность теплового потока равна $q = \alpha \cdot (t_c - t_n)$, с торцов стержня происходит испарение влаги с интенсивностью $i = i_n \cdot l^{-K\tau}$, где i_n и $K = const$.

Трехмерное дифференциальное уравнение параболического типа, описывающее этот процесс, имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Начальные условия:

$$t(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = t_n = const \quad (2)$$

Граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} \pm \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\pm R} &= \frac{\alpha}{\lambda} \cdot [t_c - t(x, y, z, \tau)|_{x=\pm R}] \\ \pm \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=\pm R} &= \frac{\alpha}{\lambda} \cdot [t_c - t(x, y, z, \tau)|_{y=\pm R}] \\ \pm \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=\pm l} &= \frac{\alpha}{\lambda} \cdot [t_c - t(x, y, z, \tau)|_{z=\pm l}] - \frac{r \cdot i_n}{\lambda} \cdot l^{-K\tau} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Все теплофизические характеристики: $\alpha, \lambda, l, \gamma$ принимались постоянными.

Для решения задачи использовался метод конечных интегральных преобразований Фурье по пространственным переменным [3-5]. Полученные решения приводятся ниже:

$$\begin{aligned} \frac{t_c - t(x, y, z, \tau)}{t_c - t_n} &= \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos\left(\mu_k \cdot \frac{x}{R}\right) \cdot e^{-\mu_k^2 \cdot F_o} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\gamma_n \frac{y}{R}\right) \cdot e^{-\gamma_n^2 \cdot F_o} \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos\left(\eta_m \frac{z}{l}\right) \cdot e^{-\eta_m^2 \cdot \frac{R^2}{l^2} \cdot F_o} + \\ &+ \frac{r \cdot i_n}{l_o} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\eta_m \cdot A_k \cdot A_n \cdot A_m \cdot \left[e^{-K_o \cdot F_o} - e^{-\left(\mu_k^2 + \gamma_n^2 + \eta_m^2 \frac{R^2}{l^2}\right) \cdot F_o} \right]}{\mu_k^2 + \gamma_n^2 + \eta_m^2 \frac{R^2}{l^2} - K_o} \end{aligned} \quad (4)$$

$$A_k = \frac{2 \cdot (\mu_k^2 + B_i^2) \cdot \sin \mu_k}{\mu_k \cdot (B_i^2 + B_i + \mu_k^2)}; \quad A_n = \frac{2 \cdot (\gamma_n^2 + B_i^2) \cdot \sin \gamma_n}{\gamma_n \cdot (B_i^2 + B_i + \gamma_n^2)}; \quad A_m = \frac{2 \cdot \left(\eta_m^2 + B_i^2 \cdot \frac{l^2}{R^2}\right) \cdot \sin \eta_m}{\eta_m \cdot \left(B_i^2 \cdot \frac{l^2}{R^2} + B_i \cdot \frac{l}{R} + \eta_m^2\right)};$$

где

Применительно к среднеобъемной температуре:

$$\frac{t_c - \bar{t}(\tau)}{t_c - t_n} = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cdot e^{-\mu_k^2 \cdot F_o} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\gamma_n^2 \cdot F_o} \sum_{m=1}^{\infty} B_m e^{-\eta_m^2 \cdot \frac{R^2}{l^2} \cdot F_o} +$$

$$+ \frac{r_u}{l_o} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\eta_m \cdot B_k \cdot B_n \cdot B_m \cdot \left[e^{-K_o \cdot F_o} - e^{-\left(\mu_k^2 + \gamma_n^2 + \eta_m^2 \cdot \frac{R^2}{l^2}\right) \cdot F_o} \right]}{\mu_k^2 + \gamma_n^2 + \eta_m^2 \cdot \frac{R^2}{l^2} - K_o} \quad (5)$$

$$B_k = \frac{2 \cdot B_i^2}{\mu_k^2 \cdot (B_i^2 + B_i + \mu_k^2)}; \quad B_n = \frac{2 \cdot B_i^2}{\gamma_n^2 \cdot (B_i^2 + B_i + \gamma_n^2)}; \quad B_m = \frac{2 \cdot B_i^2 \cdot \frac{l^2}{R^2}}{\eta_m^2 \cdot \left(B_i^2 \cdot \frac{l^2}{R^2} + B_i \cdot \frac{l}{R} + \eta_m^2 \right)}$$

где:

Таким образом, получено аналитическое решение краевой задачи, описывающей процесс нагревания стержня с теплоизолированной боковой поверхностью, с торцов которого происходит испарение влаги, применительно к локальным и среднеобъемной температурам.

Применимость полученных формул (4) и (5) проверена путем сравнения расчетных и экспериментальных полей температур. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с данными эксперимента, что показывает применимость полученных решений для оценки продолжительности стадии прогрева образца при заданной степени приближения его температуры к температуре среды.

Опытное исследование динамики сушки представляет значительный интерес для теоретических и технологических исследований [1,4,7]. Известно, что процесс сушки влажных изделий начинается при равномерном распределении влагосодержания в них, а затем происходит перераспределение влаги, вследствие испарения ее с поверхности объекта сушки.

Теоретически нахождение нестационарных полей влагосодержаний связано с рассмотрением системы дифференциальных уравнений влаго- и теплопереноса [4], аналитическое решение которой, однако, затруднено. Опытное исследование зависимости $C = f(x, y, x, \tau)$ дает возможность получить информацию о некоторых закономерностях внутреннего влаго-теплопереноса [1,4].

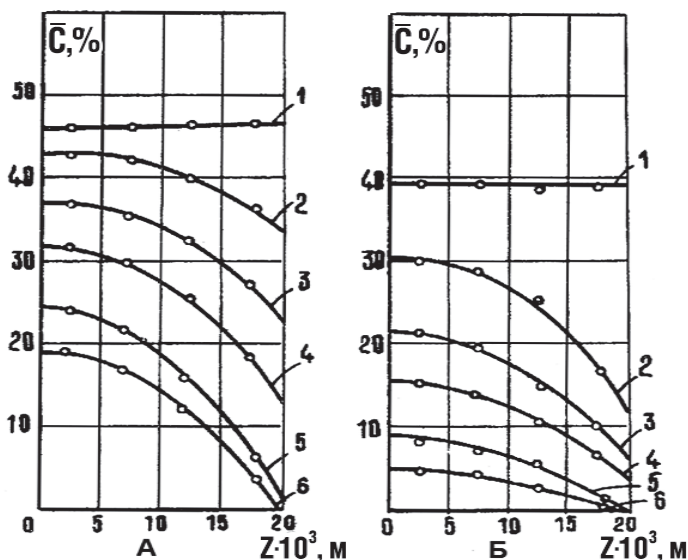
Поля влагосодержаний исследовались весовым методом при сушке модельных образцов, изготовленных из тонкодисперсного порошка ПППК ГИАП, т.к. эти образцы отвечают ряду требований, предъявляемых к объекту исследования полей влагосодержаний выбранным методом [1,3]. Исследования проводились при температурах 80, 100, 120 и 150 °С.

На рис. 1 представлены экспериментальные поля влагосодержаний образцов ПППК ГИАП, полученные при температурах 80 и 150 °С. Каждая кривая является результатом осреднения 6 опытов.

Установлено, что в диапазоне влажности (45% ± 1%) кривые $C = f(z, \tau)$ для исследуемого материала не содержат точек перегиба, влажность на поверхности понижается постепенно, достигая равновесного значения за различные промежутки времени, в зависимости от температуры. Характер распределения влагосодержаний вдоль определяющего размера образца сохраняется неизменным - как при температуре материала ниже 100°С, так и при его температуре выше 100°С, что указывает на единый для данного материала механизм массопереноса во всем диапазоне исследованных температур.

Для многих капиллярно-пористых и коллоидных материалов важное значение для технологии сушки (обеспечение качества изделий) имеет значение перепадов влагосодержаний внутри материала. Наличие чрезмерно высоких перепадов влажности приводит к нарушению структуры материала (растрескивание, коробление) [4]. Изучено изменение влажности в центре и на поверхности высушиваемых образцов катализатора, перепады влагосодержаний между центральным и поверхностным сечениями исследуемых образцов в процессе сушки при различных температурах.

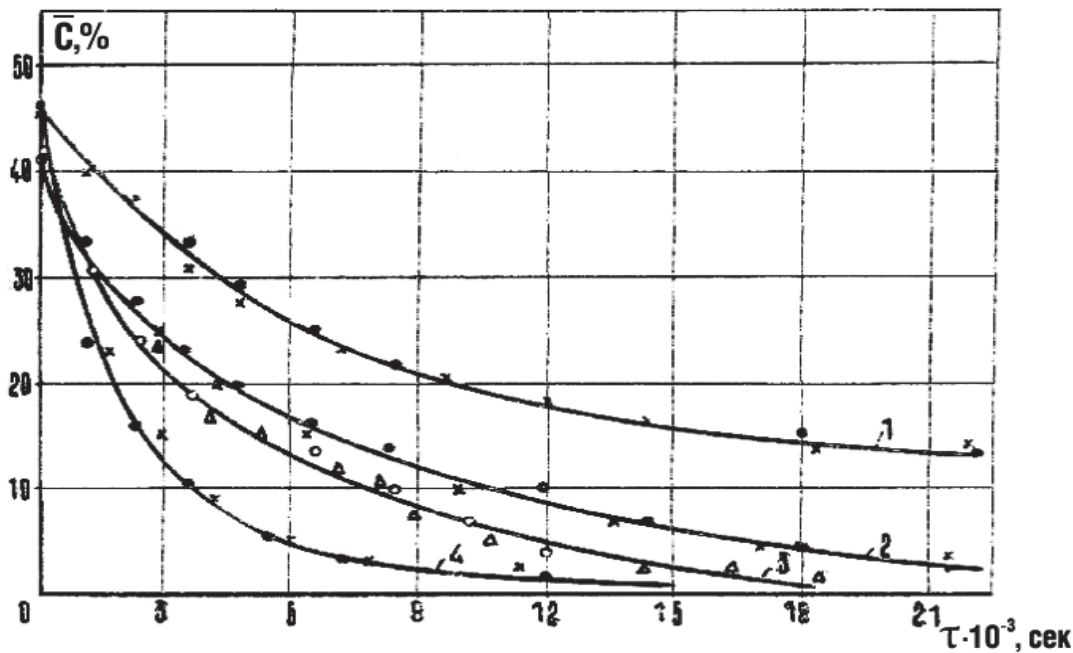
Установлено, что влияние температуры на перепады влагосодержания в исследуемом материале не однозначно: при t меньше 100°С увеличение температуры приводит к возрастанию градиента влажности на начальной стадии сушки, однако, после достижения максимума, спад градиента влажности при более высокотемпературной сушке происходит быстрее и поэтому на заключительном этапе сушки режим, соответствующий более высокой температуре характеризуется меньшими значениями градиентов влагосодержания в материале.



А) $t_c = 80^\circ\text{C}$; 1- $\tau = 00$ сек.; 2- $\tau = 1,2 \cdot 10^3$ сек.; 3- $\tau = 3,6 \cdot 10^3$ сек.;
 4- $\tau = 6,6 \cdot 10^3$ сек.; 5- $\tau = 1,8 \cdot 10^3$ сек.; 6- $\tau = 25,2 \cdot 10^3$ сек.;
 Б) $t_c = 150^\circ\text{C}$; 1- $\tau = 00$ сек.; 2- $\tau = 1,2 \cdot 10^3$ сек.; 3- $\tau = 2,4 \cdot 10^3$ сек.;
 4- $\tau = 3,6 \cdot 10^3$ сек.; 5- $\tau = 5,4 \cdot 10^3$ сек.; 6- $\tau = 7,2 \cdot 10^3$ сек.;

Рис. 1 – Поля влагосодержания при сушке образцов катализатора типа ГИАП

Среднеинтегральные влагосодержания, полученные из кривых распределения, достаточно точно совпадают с их соответствующими значениями на кривых сушки (рис.2), полученных в аналогичных условиях.



1 - $t = 80^\circ\text{C}$; 2 - $t = 100^\circ\text{C}$; 3 - $t = 120^\circ\text{C}$; 4 - $t = 150^\circ\text{C}$;
 ●, ○ - из полей влагосодержаний.

Рис. 2 – Зависимость $\bar{C} = f(\tau)$ при сушке образцов катализатора типа ГИАП

При температуре выше 100°C на начальной стадии сушки увеличение ее не приводит к существенному возрастанию градиентов, тогда как на заключительной стадии наблюдается картина, аналогичная

той, которая имела место при развитии полей при температуре меньше 100°C; чем выше t , тем меньше перепад влажности в теле.

Рассмотренная динамика развития поля влагосодержания в ПППК ГИАП объясняется в первую очередь температурной и концентрационной зависимостью коэффициентов массопроводности и массоотдачи. Как установлено, для исследуемого материала характерно значительное уменьшение коэффициента массопроводности с уменьшением влажности материала. Это обстоятельство при сушке приводит к тому, что с уменьшением влажности задача массопереноса планомерно сдвигается в область внутренней диффузии.

В связи с этим, на первом этапе сушки на кинетику процесса оказывает влияние как внешняя, так и внутренняя диффузия, поэтому увеличение t сушки оказывает воздействие на перепады влажности в материале как через коэффициент массопроводности, так и через коэффициент массоотдачи. На заключительных этапах сушки роль внешнедиффузионного сопротивления мала, и в теле формируются градиенты, величина которых определяется, при прочих равных условиях только коэффициентом массопроводности.

В этих условиях увеличение температуры, вызывая значительный прирост коэффициента массопроводности, приводит к закономерному уменьшению градиентов влагосодержания в материале.

На основании проведенного анализа перепадов влажности в материале можно сделать вывод, что проведение процесса сушки ПППК ГИАП при $t = 120 \div 150$ °C характеризуется меньшими значениями перепадов влагосодержаний, чем при $t \sim 100$ °C. Это должно вызывать меньшие механические напряжения в материале, а, значит, меньшую растрескиваемость и пыление материала.

Таким образом, проведенные исследования позволяют рекомендовать технологический режим сушки в температурном интервале 120 ÷ 150 °C, как более целесообразный с точки зрения сохранения технологических свойств продукта и техники безопасности (вследствие вредности катализаторной пыли).

Зависимость $K = f(c, t)$ при сушке ПППК ГИАП определяли зональным методом из кривых кинетики сушки, которые снимали в конвективной циркуляционной сушилке в условиях, полностью определяемых внутридиффузионным сопротивлением. Расчет коэффициента массопроводности K для каждой из выбранных зон проводили по уравнению для неограниченной пластины [1,3]. Получены зависимости $K = f(c)$ для температур 60, 80, 100 и 120 °C, его значения составляют $(3,15-0,28)10^{-10}$ м²/с при 60 °C и $(11,68-4,03)10^{-10}$ м²/с.

Перенос влаги в исследуемом материале осуществляется совокупностью различных механизмов массопереноса, характерных для капиллярно-пористых тел, таких как капиллярный перенос, пленочное течение, существование которого в капиллярно-пористых телах, стесненная диффузия пара и др. [1,2,8].

Характер зависимости $K = f(c)$ обусловлен особенностями структуры материала, в частности функцией распределения пор по размерам. При сушке катализатора вначале, очевидно, будет удаляться влага капилляров, а затем более прочно связанная адсорбционная влага [1,2,6].

Функция $K = f(c, t)$ для ПППК ГИАП аппроксимирована неполным квадратичным полиномом. Показано, что для начального периода сушки катализатора влагосодержание и температура материала примерно равнозначно определяют величину K , при дальнейшем уменьшении \bar{c} влияние температуры становится более значимым [1].

Показано, что сушка ПППК ГИАП протекает в условиях, когда на кинетику процесса существенное влияние оказывает гидродинамическая обстановка в аппарате. С увеличением скорости V от ~ 5 до ~ 11 м/сек, время сушки материала от $\bar{c}_n = 45\%$ до $\bar{c}_k = 4\%$ при 120°C сокращается ~ на 40%, дальнейшее повышение скорости не оказывает заметного воздействия на длительность процесса. Это объясняется тем, что при скорости больше 10 м/сек внешнедиффузионное сопротивление практически снимается и задача переходит в область внутренней кинетики. Следовательно, сокращение времени сушки катализатора за счет увеличения скорости теплоносителя возможно только в интервале $V < 10$ м/сек.

Проведено также исследование влияния размеров высушиваемых гранул на кинетику процесса. При сушке от $\bar{c}_n = 45\%$ до $\bar{c}_k = 4\%$ изменение определяющего размера от 0,02 м до 0,01 м сокращает время сушки ~ на 25%, а от 0,01 м до 0,005 м на 12 %. Приведенные данные, позволяют оценить эффект интенсификации процесса за счет уменьшения размера гранул.

Гранулы ПППК ГИАП являются в известной мере легко истираемыми (пылящий материал). Вследствие вредности его пыли и условий дальнейшей переработки процесс сушки стремятся проводить при режимах, исключающих повышенную истираемость гранул. Внутренние напряжения в материале, приводящие к развитию микротрещин способствуют увеличению его истираемости. Указанные напряжения

возникают в материале из-за больших перепадов влагосодержания и температуры по толщине материала [4].

Как показало проведенное исследование полей влагосодержаний, повышение температуры сушки катализатора до 100 °С сопровождается увеличением градиентов влагосодержаний. Дальнейший рост t (до 150°С) приводит к некоторому снижению этих перепадов, но более быстрому развитию их во времени.

В целом результирующий эффект развития напряжений в материале при повышении температуры от 100 °С до 150 °С, вследствие наличия противоположно действующих факторов (уменьшение градиентов влагосодержаний и увеличение скорости их образования в материале) может быть таковым, что условия сушки при 120-150 °С в отношении истираемости будут не хуже, чем при 100 °С.

Таким образом, следует считать перспективным изучение возможности интенсификации процесса сушки данного материала путём повышения температуры сушильного агента со 100÷120 °С до 120÷140 °С с учетом допустимой истираемости продукта и требований к его качеству.

Учет изменения всех параметров процесса сушки материала (в частности, в плотном продуваемом слое, высушиваемом периодически или на ленточной сушилке) осуществить при расчете еще более сложно, чем при сушке одиночных изделий; это требует разработки специальных методик. Предложен экспресс-метод приближенного расчета кинетики процесса сушки влажных материалов, учитывающий их массопроводные свойства при усредненных значениях кинетических коэффициентов (1,2,6).

Обозначения:

C, \bar{C} – локальное и среднее по объему влагосодержание материала, кг, влаги/кг сух. мат. 100% ; τ – время, сек., (час); x, y, z – пространственные координаты; v – скорость, м/сек.; K – коэффициент массопроводности, м²/сек; R – определяющий размер тела, м; $t, (T)$ – температура, °С, (°К); α – коэффициент температуропроводности, м²/сек.; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/град·м; g – скрытая теплота испарения, Дж/кг ; i – плотность потока влаги, кг/м²·сек; q – плотность потока тепла, Дж/м²·сек ; ε – критерий фазового превращения; C^* – удельная теплоемкость, Дж/кг·град.; δ – относительный коэффициент термодиффузии, 1/град; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·град;

Индексы: n – начальное значение; k – конечное значение, p – равновесное значение, s – среды, kr – критическое значение, p – у поверхности тела, $ц$ – в центре тела, $оп$ – опытное значение, i – в i -той зоне.

Выводы

1. Получено аналитическое решение краевой задачи, описывающей процесс нагревания стержня с теплоизолированной боковой поверхностью, с торцов которого происходит испарение влаги - применительно к локальным и среднеобъемной температурам, рекомендуемое для оценки продолжительности стадии прогрева образца в опытах по исследованию массопроводности.

2. Исследована динамика процесса сушки промежуточного продукта получения катализатора ГИ-АП. Показано единство механизма массопереноса в данном материале при различных температурах сушки.

3. Проведена количественная оценка возможной интенсификации процесса сушки исследуемого материала за счёт активизации гидродинамической обстановки, изменения размера высушиваемых образцов и повышения температуры.

Литература

1. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. — М.: Химия, 1980 — 248 с.
2. Сажин Б.С., Кошелева М.К. Процессы сушки и промывки текстильных материалов.— М.: ФГБОУ ВПО. «МГУДТ», 2013. – 301 с.
3. Рудобашта С.П., Каргашов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. -2-е изд., перераб. и доп.-ил. — М.: КолосС, 2010 — 478 с.
4. Лыков А.В. Теория сушки. — М.: Изд. «Энергия», 1968 — 472 с.
5. Кришер О. Научные основы техники сушки. — М.: ИЛ., 1961 — 540 с.
6. Kosheleva M.K. and others. Kinetics calculation for temperature driving of polymer materials and multisectional driving of textile materials. 2-end European Congress off Chemical Engineering, Le Comm. Montpellier. France. 1999.
7. Рудобашта С.П., Кошелева М.К., Разумеев К.Э. Расчёт процесса сушки гранул поликапроамида. Изв. вузов. Химия и хим. технология, – 2013. Т. 56. Вып. 12. с. 110
8. Кошелева М.К., Шацких С.Н. Resource-saving technology for Saxony fabric. Вестник ТГТУ. 2013. Том 19. № 3, С.584-592.