



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 66.047

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.030



ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПОЛИКАПРОАМИДА

Алёна Павловна Федорова¹, Даниил Романович Юдин²

^{1,2} Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) Москва, Россия

¹ alenka.savostina@yandex.ru

² 21nirvana12@mail.ru

Аннотация. В статье приводится обзор работ расчета кинетики процесса сушки поликапроамида. Поликапроамид – востребованный производственный материал, отличающийся высокими эксплуатационными свойствами. После экстрагирования показатель влажности поликапроамида составляет 13-15 %, однако для дальнейшего использования в производстве этот параметр должен быть не более 0,05 %, что обуславливает важность обеспечения качественной сушки материала. Особенности процесса сушки поликапроамида являются высокий уровень водопоглощения – 2-3 % влаги по массе на воздухе и 6-8 % в воде, а также резкое замедление процесса сушки при низких значениях влажности, что приводит к неравномерному распределению влаги. Для обеспечения тщательной просушки материала требуется расчёт кинетики обезвоживания гранул поликапроамида. Для достижения цели исследования были использованы аналитический и синтетический методы изучения вторичных материалов по кинетике процесса сушки поликапроамида, использован системно-структурный подход. Сушка выступает типичным тепло- и массообменным процессом, поэтому её кинетика зависит от формы связи влаги с материалом. Сушка является последним этапом технологического процесса производства поликапроамида непрерывным способом – гидролитической полимеризацией ϵ -капролактама в расплаве. Процесс осуществляется в сушильной колонне, в которой поддерживается азотная среда температурой +120-140 °C, на протяжении 10-14 часов. Экспериментальные кривые кинетики сушки гранул поликапроамида показывают, что величина коэффициента массопроводности имеет высокую зависимость от влагосодержания и температуры высушиваемого материала. Показатель итогового влагосодержания обратно пропорционален величинам стартовой температуры и расхода азота. Значительнее всего на итоговое влагосодержание влияет величина гранул поликапроамида.

Ключевые слова: поликапроамид, полимеризация, производство непрерывным способом, сушильная колонна, сушка, влагосодержание, гранулят, кинетика, массообмен, массопроводность.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования: Федорова А. П., Юдин Д. Р. Изучение кинетики процесса сушки поликапроамида // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 193–198. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.030. EDN: <https://elibrary.ru/SSTLMK>.

Original article

STUDYING KINETICS OF POLYCAPRAMIDE DRYING PROCESS

Alena P. Fedorova¹, Daniil R. Yudin²

^{1,2} Russian State University named after A. N. Kosygin (Technology. Design. Art) Moscow, Russia

¹ alenka.savostina@yandex.ru

² 21nirvana12@mail.ru

Abstract. The article analyzes the kinetics of the polycaproamide drying process. Polycaproamide is a popular production material with high performance properties. After extraction, the moisture content of polycaproamide is 13-15%, but for further use in production this parameter should be no more than 0.05%, which determines the importance of ensuring high-quality drying of the material. The features of the polycaproamide drying process are a high level of water absorption - 2-3% moisture by weight in air and 6-8% in water, as well as a sharp slowdown in the drying process at low humidity values, which leads to uneven distribution of moisture. To ensure thorough drying of the material, it is necessary to calculate the kinetics of dehydration of polycaproamide granules. To achieve the goal of the study, analytical and synthetic methods were used to study secondary materials on the kinetics of the polycaproamide drying process, and a systemic-structural approach was used. Drying is a typical heat and mass exchange process, so its kinetics depends on the form of moisture bond with the material. Drying is the last stage of the technological process of polycaproamide production by a continuous method - hydrolytic polymerization of ϵ -caprolactam in the melt. The process is carried out in a drying column, in which a nitrogen environment is maintained at a temperature of + 120-140 ° C, for 10-14 hours. Experimental curves of the kinetics of drying polycaproamide granules show that the value of the mass conductivity coefficient has a high dependence on the moisture content and temperature of the dried material. The indicator of the final moisture content is inversely proportional to the values of the starting temperature and nitrogen consumption. The size of the polycaproamide granules has the greatest effect on the final moisture content.

© Федорова А. П., Юдин Д. Р., 2025

Keywords: polycapramide, polymerization, continuous production, drying column, drying, moisture content, granulate, kinetics, mass transfer, mass conductivity.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to his / her colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.

For citation: Fedorova A.P., Yudin D. R (2024). Studying kinetics of polycapramide drying process. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 193-198. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.030. EDN: <https://elibrary.ru/SSTLMK>.

ВВЕДЕНИЕ

Поликапроамид (полиамид-6, ПА 6, капрон, найлон-6) – алифатический полиамид, нетоксичный конструкционный высокомолекулярный полимер, обладающий высокой твёрдостью и механической прочностью, диэлектрическими и антифрикционными свойствами, износо- и теплостойкостью, деформационной стабильностью, малой плотностью и низким коэффициентом трения [1]. Вещество физиологически безвредно, отличается химической стойкостью и устойчивостью к влиянию большей части растворителей, растворяясь только во фторированных спиртах, концентрированной серной и муравьиной кислотах.

Поликапроамид используется для производства деталей, которые работают в условиях повышенных механических нагрузок, изоляционных и уплотнительных материалов, полимерных термостабилизаторов и концентратов красителей, а также композиционных материалов, которые отличаются ударопрочностью, трудногорючестью, морозо- и водостойкостью [2]. В промышленности полиамид-6 получают преимущественно путём гидролитической полимеризации ϵ -капролактама в расплаве. Итоговая стадия процесса – сушка гранулята – имеет большое значение для получения продукции высокого качества, поскольку после экстрагирования показатель влажности поликапроамида составляет 13-15 %, однако для дальнейшего использования в производстве этот параметр должен быть не более 0,05 %.

Особенностями процесса сушки поликапроамида являются высокий уровень водопоглощения – 2-3 % влаги по массе на воздухе и 6-8 % в воде, а также резкое замедление процесса сушки при низких значениях влажности, что приводит к неравномерному распределению влаги [3]. Для обеспечения высокого качества готовой продукции важной задачей является тщательная просушка материала, требующая расчёта кинетики обезвоживания гранул полиамида-6.

Целью работы является изучение кинетики процесса сушки поликапроамида непрерывным способом.

Для её достижения были поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть специфику процесса сушки влажных материалов.
2. Рассмотреть технологический процесс производства поликапроамида непрерывным способом.
3. Составить материальный баланс процесса сушки поликапроамида
4. Определить ключевые параметры зависимости конечного влагосодержания гранул поликапроамида.

МЕТОДЫ

Для достижения цели исследования были использованы аналитический и синтетический методы изучения вторичных материалов по кинетике процесса сушки поликапроамида, использован системно-структурный подход.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кинетика процесса сушки представляет собой

изменение средних показателей влажности и температуры, рассматриваемых относительно объёма высушиваемого материала, с течением времени [4]. На основе данного процесса подбираются параметры сушильного агента, тип и габариты сушильного аппарата. Сушка выступает типичным массо- и теплообменным процессом, поэтому её кинетика зависит от формы связи влаги с материалом.

Количественное содержание влаги в материале выражается показателями относительной (ω) и абсолютной (ω^c) влажности. В процессе исследования кинетики процесса осушения обычно используется показатель абсолютной влажности, поскольку объём сухого вещества стабилен при изменении внешних условий. Значения показателей содержания влаги связаны следующими зависимостями:

$$\omega^c = \frac{\omega}{1 - \omega},$$

$$\omega = \frac{\omega^c}{1 + \omega^c}.$$

Скорость процесса осушения определяется сокращением показателя влажности материала $d\omega^c$ за некоторый отрезок времени $d\tau$:

$$\vartheta = \frac{d\omega^c}{d\tau}.$$

При рассмотрении конечных временных параметров средняя скорость осушения соответствует количеству влаги (ΔW), удалённой по отношению к сухому веществу (G_{ac}) за единицу времени ($\Delta \tau$):

$$\vartheta_{cp} = \frac{\Delta W}{G_{ac} \Delta \tau} = \frac{\Delta \omega^c}{\Delta \tau}.$$

При исследовании кинетики процесса осушения влагосодержащих материалов обычно применяется параметр скорости, а не интенсивности, поскольку для расчёта последнего требуется установить массу влаги, извлечённой с единицы поверхности образца за единицу времени, и на практике определение истинной поверхности материала – сложная задача. Помимо этого, для материалов, склонных к усадке, в процессе сушки поверхность уменьшается.

Отдельные компоненты процесса влаго- и теплопереноса внутри влажных материалов не рассчитываются аналитическими методами [5]. Это обусловлено его высокой сложностью, связанной с влиянием множества внутренних и внешних факторов – составом и структурой материала, характеристиками процесса осушения и спецификой выбранного сушильного агента. По этой причине кинетика процесса сушки обычно изучается экспериментальным путём, позволяющим вывести зависимости между температурой прогрева материала, кривой и скорости сушки. На основании этих зависимостей оцениваются формы связи влаги с материалом, рассчитывается время сушки, подбирается оптимальный режим сушки, проектируются и рассчитываются промышленные сушильные аппараты.

Сушка является заключительным этапом производства поликапроамида непрерывным способом, следующим за стадиями подготовки сырья, полиме-

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПОЛИКАПРОАМИДА

ризации ϵ -капролактама, охлаждения, размельчения и экстрагирования [6]. Технологическая схема получения поликапроамида представлена на рис. 1.

До транспортировки в установку ϵ -капролактама в кристаллической форме находится в хранилище 1 под азотной подушкой при температуре $+95^{\circ}\text{C}$ [7]. Из хранилища винтовым питателем-дозатором он перемещается в плавильную колонну 2, где в азотной среде (содержание $\text{O}_2 \leq 0,0005\%$) плавится при перемешивании с подогревом до $+90-100^{\circ}\text{C}$ на протяжении 40-50 минут, после чего подвергается стабилиза-

ции. Через фильтр 3 посредством сжатого азота осуществляется непрерывное перемещение вещества в колонну полимеризации 4.

Чтобы сдерживать процесс кристаллизации расплава, фильтр и трубы подвергаются постоянному прогреву парами даутерма А температурой $+270^{\circ}\text{C}$. В аппарате 5 при перемешивании с подогревом готовится 40%-ный раствор адипината, использующийся в качестве активационного агента. Готовый раствор безостановочно транспортируется в колонну полимеризации, в которой поддерживается температура $+250-270^{\circ}\text{C}$.

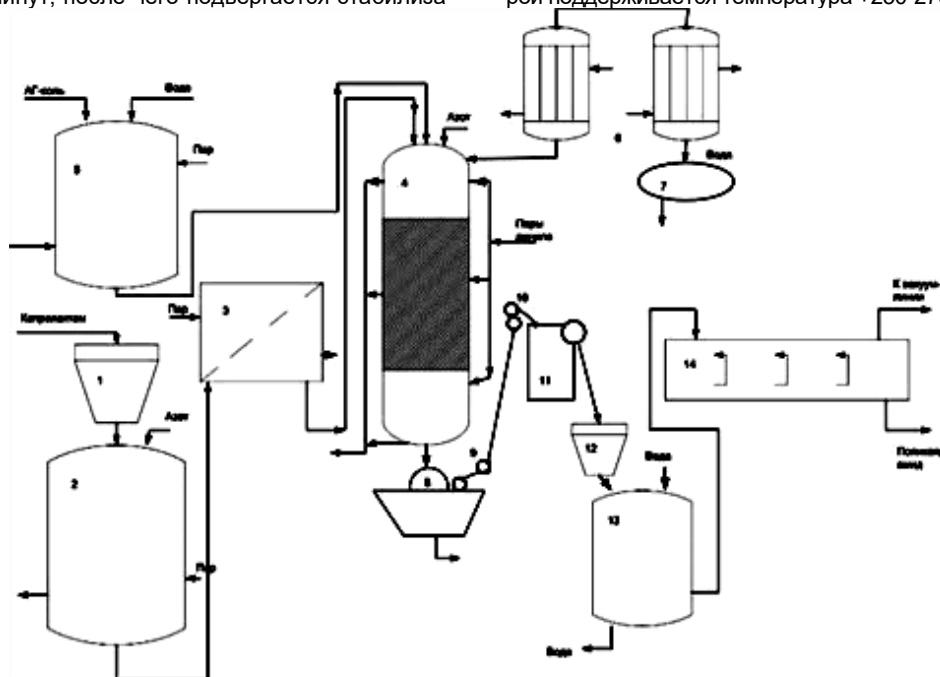


Рисунок 1 – Технологическая схема получения поликапроамида гидролитической полимеризацией ϵ -капролактама в расплаве:

1 – расходный бак для реакционной смеси; 2 – плавильная колонна; 3 – фильтр; 4 – колонна полимеризации; 5 – аппарат для изготовления раствора адипината; 6 – вакуумный эвакуатор; 7 – водосборник; 8 – поливочный барабан; 9 – ориентирующие вилки; 10 – вытягивающие вилки; 11 – резочный станок; 12 – хранилище крошки; 13 – экстракционный аппарат; 14 – вакуумная сушилка

Figure 1 – Technological scheme for the production of polycaproatamide by hydrolytic polymerization of ϵ -caprolactam in the melt:

1 – supply tank for reaction mixture; 2 – melting column; 3 – filter; 4 – polymerization column; 5 – apparatus for producing adipate solution; 6 – vacuum tow truck; 7 – water collector; 8 – watering drum; 9 – orienting forks; 10 – pulling forks; 11 – cutting machine; 12 – crumb storage; 13 – extraction apparatus; 14 – vacuum dryer

На внутренней стороне колонны в интервале 300 мм размещены горизонтальные перфорированные тарелки, предназначенные для турбулизации и перемешивания реакционной массы, спускающейся вниз. Наиболее высокий температурный режим поддерживается в середине аппарата.

Побочным продуктом полимеризации является вода, пары которой на выходе из аппарата утягивают за собой пары ϵ -капролактама. Чтобы вернуть вещество в зону активной реакции и запустить дополнительную поликонденсацию, паровая смесь транспортируется в вакуумный эвакуатор 6, в которых ϵ -капролактама конденсируется в колонну, а отделённая вода собирается в водосборник 7. На этом этапе содержание низкомолекулярных соединений оставляет 6-8 %.

Жидкий полимер из аппарата направляется либо на гранулирование в подводный гранулятор, либо, в соответствии с классической схемой, в экструзионную головку, из которой выдавливается струями сквозь щель на поверхность поливочного барабана 8 с водой,

прошедшей удаление ионов кальция и магния [8]. На барабан подаётся вода температурой $+20-25^{\circ}\text{C}$, отводится – $+25-35^{\circ}\text{C}$. На барабане осуществляется охлаждение и затвердевание полимера, который посредством ориентирующих и вытягивающих вилок 9 и 10 поступает в резочный станок 11. Полимер фрагментируется в крошку, которая накапливается в хранилище 12 и передаётся массонасосом в экстракционный аппарат непрерывного действия 13 на многократную промывку водой температурой $\geq +110^{\circ}\text{C}$ для удаления не вступившего в реакцию ϵ -капролактама. Процесс экстракции длится 4-5 часов. После экстракции гранулы поликапроамида содержат большое количество влаги, для удаления которой они направляются в вакуумную сушилку непрерывного действия 14, в которой поддерживается азотная среда температурой $+120-140^{\circ}\text{C}$. Продолжительность сушки составляет 10-14 часов. За это время остаточное содержание влаги в гранулах снижается до 0,05 %.

На основе технологической схемы получения

поликапроамида можно рассчитать материальный баланс стадии сушки [9]. Часовая производительность по полиамиду-6 $G_0 = \frac{N}{T_{\text{эф}}} = 2424,25$ кг/ч. Показатель $G_{\text{вых}}$ включает:

- полиамид-6 гранулированный = 87,01 %;
- низкомолекулярные соединения (НМС) = 0,5 %;
- остатки воды = 0,03 %;
- отводящаяся вода = 12,97 %;
- отходы поликапроамида = 0,02 %.

Массовый расход поликапроамида составляет

$$G_{\text{МП сушки}} = \frac{G_{\text{ПКА}}}{\omega_{\text{ПКА}}} \cdot 100 = \frac{2424,25}{87,01} \cdot 100 = 2786,17 \text{ кг/ч,}$$

где $\omega_{\text{ПКА}}$ – содержание поликапроамида (%); $G_{\text{ПКА}}$ – выход полиамида-6 (кг/ч).

Выход воды составляет

$$G_{\text{H}_2\text{Oв}} = \frac{G_{\text{МП сушки}}}{100} \cdot \omega_{\text{H}_2\text{Oв}} = \frac{2786,17}{100} \cdot 12,97 = 361,36 \text{ кг/ч,}$$

где $\omega_{\text{H}_2\text{Oв}}$ – содержание удаляемой воды (%); $G_{\text{H}_2\text{Oв}}$ – выход воды (кг/ч).

Выход отходов гранулята составляет

$$G_{\text{отходы}} = \frac{G_{\text{МП сушки}}}{100} \cdot \omega_{\text{отходы}} = \frac{2786,17}{100} \cdot 0,02 = 0,56 \text{ кг/ч,}$$

где $\omega_{\text{отходы}}$ – содержание отходов гранулята (%); $G_{\text{отходы}}$ – выход отходов гранулята (кг/ч).

Выход поликапроамида после экстрагирования с содержанием НМС составляет

$$G_{\text{гранулы с НМС}} = \frac{G_{\text{МП сушки}}}{100} \cdot \omega_{\text{ПКА}} = \frac{2786,17}{100} \cdot 87,01 = 2424,25 \text{ кг/ч.}$$

Расход воды на стадии сушки составляет

$$G_{\text{H}_2\text{Oр}} = \frac{G_{\text{ПКА}}}{100} \cdot \omega_{\text{H}_2\text{Oр}} = \frac{2786,17}{100} \cdot 0,03 = 0,84 \text{ кг/ч,}$$

где $\omega_{\text{H}_2\text{Oр}}$ – содержание остаточной воды (%); $G_{\text{H}_2\text{Oр}}$ – расход воды (кг/ч).

Рассмотрим строение сушильной колонны. Она представляет собой вертикальный аппарат высотой с конусным днищем и сферической крышкой [10]. В крышке расположены штуцеры, через которые осуществляется подача гранул поликапроамида и выход отработанного азота (рис. 2).

Колонна состоит из двух зон: предварительной и финальной сушки [11]. В обеих зонах установлены распределительные кольца для азота. Для подачи потоков азота в нужном направлении, усиления их действия и обеспечения эффективной сушки поликапроамида в распределительных кольцах, фиксаторах колец и частях кожуха, расположенных около штуцеров, через которые подаётся азот, предусмотрена круговая перфорация диаметром 1,6 мм.

В процессе работы сушильная колонна полностью заполнена гранулами поликапроамида. Для поддержания равного уровня заполненности используется механизм автоматического регулирования оборотов роторного шлюзового затвора-дозатора, который установлен на пути транспортировки сухих гранул из колонны.

Продолжительность процесса осушения поликапроамида τ (ч) составляет

$$\tau = -\frac{r^2}{\pi^2} \cdot \frac{1}{D} \cdot \ln\left(\frac{X_{m,\tau}}{X_{m,s}} \cdot \frac{\pi^2}{6}\right),$$

где r – молекулярный радиус (м); $X_{m,\tau}$ – содержание влаги в гранулах в момент времени τ (кг/кг); $X_{m,s}$ – содержание влаги в гранулах в момент начала осушения (кг/кг); D – коэффициент диффузии воды в твёрдом поликапроамиде (м²/с) [12].

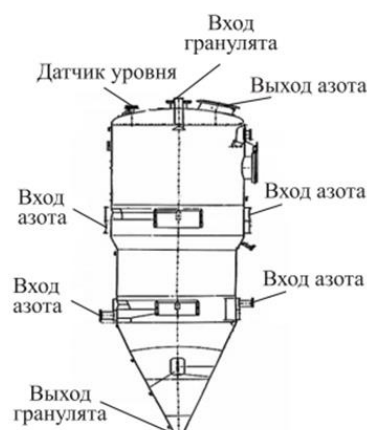


Рисунок 2 – Сушильная колонна
Figure 2 – Drying column

Экспериментальные кривые кинетики сушки гранул поликапроамида зональным методом позволяют определить концентрационные зависимости коэффициента массопроводности при различных температурах сушильного агента и осушаемого материала [13]. Анализ концентрационных зависимостей коэффициента массопроводности гранул поликапроамида демонстрирует их типичный для полимеров вид. Процесс массопереноса при осушении полимеров имеет существенные отличия от капиллярно-пористых дисперсных материалов: резкий переход процесса массопереноса из экзогенной области в эндогенную; полный контроль скорости протекания процесса во втором периоде диффузией молекул внутренней влаги; значительное влияние равновесной влажности материала на кинетику осушения; стремительный прогрев материала до выравнивая температуры с сушильным агентом, что приводит к протеканию процесса в условиях почти полного равенства температур находящихся во взаимодействии фаз.

Микрокинетика осушения гранул поликапроамида определяется его диффузионными свойствами и значением равновесного влагосодержания. Показатель энергии активации диффузии обратно пропорционален влагосодержанию материала.

Сушка гранул поликапроамида может осуществляться в гребковых вакуум-сушилках либо при атмосферном давлении под азотной подушкой в плотном, кипящем или виброкипящем слоях [14]. Экзогенная либо переходная задача повышения скорости процесса осушения решается путём перехода от плотного к виброкипящему либо кипящему слоям, эндогенная – увеличением площади массообмена (экранировкой поверхности гранулята).

В процессе приведения слоя гранул полиамида-6 в кипящее или виброкипящее состояние активизируется гидродинамический режим сушки, вследствие чего возможно добиться значительного повышения температуры без слипания частиц [15]. Так, при увеличении температуры от +90 до +150 °С коэффициент массопроводности возрастает в восемь раз в интервале влагосодержания полимера от 2 до 0,05 %, в результате чего продолжительность процесса сушки сокращается в шесть раз (рис. 3).

Расчётные данные показывают, что оптимально поддержание небольших скоростей движения сушильного агента. Для устранения экранирования поверхности гранулята и поддержания равномерного нагрева могут

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПОЛИКАПРОАМИДА

применяться малые числа кипения либо специальные мешалки, устанавливаемые в неподвижном слое. Также повысить показатели скорости процесса осушения можно путём фокусированного воздействия на структуру материала с целью увеличения коэффициента массопроводности, посредством увеличения фрагментации гранул и изменения их формы.

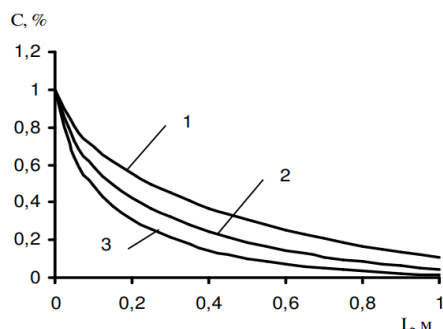


Рисунок 3 – Кривые сушки гранул поликапроамида при различных температурах: 1 – 90°C, 2 – 120°C, 3 – 150°C

Figure 3 – Drying curves of polycapraamide granules at different temperatures: 1 – 90°C, 2 – 120°C, 3 – 150°C

В наибольшей степени замедление процесса сушки при увеличении радиуса или длины частиц зависит не от формы гранулы, а от её объёма, который также возрастает [16]. Влагоперенос в процессе осушения представляет собой перенос жидкой фазы, осуществляемый за счёт градиента дифференцирующего давления в периферийных слоях воды, если влажность материала ниже максимальной гигроскопической влажности, а также как перенос паровой составляющей, образование которой происходит во всём объёме. Изменение средней объёмной влажности гранулы поликапроамида во времени представлено на рисунке 4.

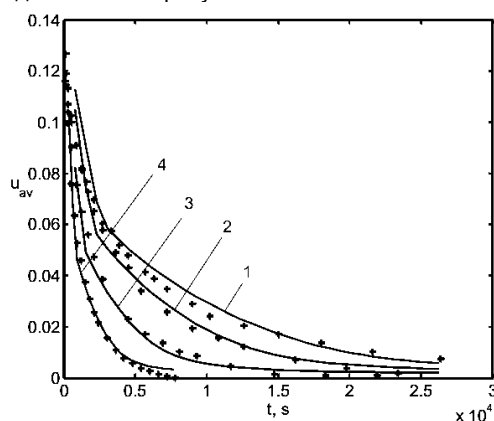


Рисунок 4 – Изменение во времени среднего объёма влажности гранулы поликапроамида с радиусом $R_{gr} = 1,375 \cdot 10^{-3}$ м, длиной $L_{gr} = 0,04$ м, при относительной влажности $\omega_c = 0,03$ и температуре $T_c = 373$ К – 1, 383 – 2, 403 – 3, 423 – 4

Figure 4 – The change in time with the average volume of moisture content of the polycapraamide granule with radius $R_{gr} = 1,375 \cdot 10^{-3}$ m, length $L_{gr} = 0,04$ m at relative humidity $\omega_c = 0,03$ for temperature $T_c = 373$ K – 1, 383 – 2, 403 – 3, 423 – 4

Важно учитывать, что в непрерывно действующей колонне кипящего слоя гранулы поликапроамида

продольно перемешиваются, вследствие чего отдельные влажные гранулы проскальзывают на выход аппарата. Данный эффект нежелателен при осуществлении глубокого осушения материала непосредственно перед переработкой, поскольку даже незначительное наличие влаги в расплаве полимера приводит к серьезным последствиям: гидролизу и деградации расплава, вспениванию массы, уменьшению показателя кристалличности, снижению прочностных свойств и качества поверхности изделий, неоднородности светопропускания и локальным колебаниям цветности.

Для исключения данных последствий требуется сформировать и поддерживать режим идеального вытеснения твёрдой фазы в сушильных аппаратах кипящего слоя, чего можно достигнуть при применении аппарата, имеющего лотковую конструкцию, и устанавливая горизонтальные либо вертикальные дифференцирующие перегородки.

ВЫВОДЫ

В процессе сушки поликапроамида на конечное влагосодержание влияют начальная температура и расход азота: с повышением этих параметров конечное влагосодержание сокращается. Значительнее всего на итоговое влагосодержание влияет величина гранул. В случае фиксированного диаметра частиц рационально использовать температуру азота в качестве управляющего параметра. В целях экономии энергозатрат сушку гранул поликапроамида в атмосферных сушильках целесообразно проводить без применения активных гидродинамических режимов, полагаясь только на процесс эндогенного массопереноса. Интенсифицировать процесс сушки можно путём уменьшения величины гранул, проведения процесса в аппаратах виброкипящего или кипящего слоя при поддержании малых параметров кипения и максимально допустимой температуре. При этом важно учитывать, что в непрерывно функционирующих аппаратах кипящего слоя требуется обеспечивать гидродинамическую структуру потока гранул поликапроамида, приближенную к режиму идеального вытеснения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадыров А.Р., Кузьмин В.В. Поликапроамид, свойства, области применения и способы получения // Студенческий. 2021. № 16-4 (144). С. 60-62.
2. Имитационное моделирование стадии синтеза поликапроамида для управления процессом его промышленного получения / Е.А. Алексеев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2014. № 4 (22). С. 108-112.
3. Расчетно-экспериментальное исследование совмещённого процесса сушки и деполимеризации полиамида-6 в аппарате периодического действия / А.А. Липин [и др.] // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51, № 3. С. 315-322. DOI: 10.7868/S0040357117030095
4. Изучение кинетики процесса сушки влажных материалов // Ивановский государственный химико-технологический университет. URL: <https://www.isuct.ru/dept/chemkiber/piaht/metodwork/drying/drying2.htm#1> (дата обращения: 06.07.2024).
5. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Ленинград: Химия, Ленинградское отделение, 1987. 207 с.
6. Способ получения полиамида-6 Пат. 2471816 Российская Федерация, МПК C1 C08 G69/16 / А.С. Колобков [и др.]; заявитель и патентообладатель Ивановский гос. химико-технологич. ун-т - № 2471816; заявл. 10.01.2012; опубл. 10.01.2013; Бюл. №1.

7. Барвинский И.А., Барвинская И.Е. Полиамид 6 (PA 6) // Справочник по литыевым термопластичным материалам. – 2020. – URL: http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials_PA6.htm (дата обращения: 06.07.2024).

8. Полиамиды: их классификация, сырье и основные методы получения. Лекция 25. Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2019. 8 с.

9. Технологический регламент производства гранулята поликапроамида ПА6. ОАО «Щекиноазот», Р-14-29-01-2007, 2007. 196 с.

10. Полиамиды. Технология и оборудование // Современные технологии производства. – URL: <https://extxe.com/6899/poliamidy-tehnologija-i-oborudovanie/> (дата обращения: 06.07.2024).

11. Тихонов Н.Н., Шерышев М.А. Оборудование подготовительных процессов заводов пластмасс : учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Москва : Юрайт, 2024. 302 с.

12. Талипова И.П., Арсланов И.М. Расчет сушильных установок : учебно-методическое пособие / под ред. И.П. Талиповой. Набережные Челны : Изд.-полиграфич. центр НЧИ КФУ, 2019. 69 с.

13. Коселева М.К., Дорняк О.Р., Федорова А.П. Массопроводность поликапроамида при конвективной сушке // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2022): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 87-89.

14. Расчет процесса сушки гранул поликапроамида / С.П. Рудобашта [и др.] // Основные процессы и техника промышленных технологий: сборник научных трудов кафедры ПАХТ и БЖД. Москва, 2014. С. 88-95.

15. Липин А.А., Липин А.Г., Кириллов Д.В. Прогнозирование рациональных режимно-технологических параметров процесса сушки гранулированного поликапроамида // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 4, № 4 (62). С. 106-109.

16. Kosheleva, M., Dorniyak, O., Maklusova, M. (2018). Modeling of kinetics of drying process of polycapraamide granules considering its sorption properties. *21st International Drying Symposium Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València, 387-394. DOI: 10.4995/IDS2018.2018.7553.

Информация об авторах

А. П. Федорова – аспирант кафедры «Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности» Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство).

Д. Р. Юдин – аспирант кафедры «Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности» Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство).

REFERENCES

1. Kadyrov, A.R., Kuz'min, V.V. (2021). Polycapraamide, properties, applications and methods of production. *Studencheskii*, (16-4 (144)), 60-62. (In Russ.).

2. Alekseev, E.A., Golovushkin, B.A., Labutin, A.N., Erofeeva, E.V. (2014). Simulation modeling of the stage of polycapraamide synthesis to control the process of its industrial production. *News of higher educational institutions. Series: Economics, finance and production management*, (4 (22)), 108-112. (In Russ.).

3. Lipin, A.A., Lipin, A.G., Bazarov, Yu.M., Barannikov, M.V.,

Mizerovsky, L.N. (2017). Calculation and experimental study of the combined process of drying and demonomerization of polyamide-6 in a batch apparatus. *Theoretical foundations of chemical technology*, (51 (3)), 315-322. (In Russ.). DOI: 10.7868/S0040357117030095

4. Study of the kinetics of the drying process of wet materials. Ivanovo State University of Chemical Technology. Retrieved from <https://www.isuct.ru/dept/chemkiber/piaht/metodwork/drying/drying2.htm#1> (In Russ.).

5. Frolov V.F. *Modeling of drying of dispersed materials*. Leningrad : Chemistry, Leningrad branch. (In Russ.).

6. Bazarov, Yu.M., Mizerovsky, L.N., Kolobkov, A.S., Silant'yeva, V.G. (2013). Method of producing polyamide-6. Pat. 2471816. *Russian Federation, published on 10.01.2013*; Bull. No. 1. (In Russ.).

7. Barvinskii, I.A., Barvinskaya, I.E. Poliamid 6 (PA 6) (2020). Handbook of injection molded thermoplastic materials. Retrieved from http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials_PA6.htm (In Russ.).

8. Polyamides: their classification, raw materials and main methods of production. Lecture 25. Minsk: Belarusian State Technological University, 2019. (In Russ.).

9. Technological regulations for the production of PA6 polycapraamide granulate (2007). JSC «Shchekinoazot», R-14-29-01-2007 (In Russ.).

10. Polyamides. Technology and equipment. Modern production technologies. Retrieved from <https://extxe.com/6899/poliamidy-tehnologija-i-oborudovanie/> (In Russ.).

11. Tikhonov, N.N., Sheryshev, M.A. (2024). *Equipment for preparatory processes of plastics factories: a textbook for universities*. 2nd ed., rev. and additional Moscow: Yurayt. (In Russ.).

12. Talipova, I.P., Arslanov, I.M. (2019). *Calculation of drying installations: educational manual*. Naberezhnye Chelny : Publishing and printing center of NChI KFU. (In Russ.).

13. Kosheleva, M.K., Dorniyak, O.R., Fedorova, A.P. (2022). Mass conductivity of polycapraamide during convective drying. *Design, technologies and innovations in the textile and light industry (INNOVATIONS-2022): collection of materials of the International Scientific and Technical Conference*, Moscow, 87-89. (In Russ.).

14. Rudobashta, S.P., Kosheleva, M.K., Razumeev, K.E., Pichugin, A.V. (2014). Calculation of the drying process of polycapraamide granules. *Basic processes and equipment of industrial technologies: collection of scientific works of the department of the department of PACT and BZD*, Moscow, 88-95. (In Russ.).

15. Lipin, A.A., Lipin, A.G., Kirillov, D.V. (2011). Forecasting rational regime-technological parameters of the drying process of granulated polycapraamide. *Bulletin of the Saratov State Technical University*, (4, (62)), 106-109. (In Russ.).

16. Kosheleva, M., Dorniyak, O., Maklusova, M. (2018). Modeling of kinetics of drying process of polycapraamide granules considering its sorption properties. *21st International Drying Symposium Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València, 387-394. DOI: 10.4995/IDS2018.2018.7553

Information about the authors

A.P. Fedorova – postgraduate student of the Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety Russian State University named after A. N. Kosygin (Technology. Design. Art).

D.R. Yudin – postgraduate student of the Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety Russian State University named after A. N. Kosygin (Technology. Design. Art).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 21 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.