



Существующие подходы к автоматизации процесса сушки материалов в режиме кипящего слоя

Р. Ю. Дадиомов¹, А. Г. Шумихин², Д. К. Корнилицин²

¹ООО Спутник-2

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Аннотация: В представленной работе приводится обзор подходов к автоматизации процесса сушки в режиме кипящего слоя. В качестве объекта управления рассмотрен технологический процесс сушки хлористого калия в аппарате кипящего слоя на калийном предприятии.

В ходе анализа объекта управления отмечено, что, по обобщенному мнению технического персонала рассматриваемого производства, типовые алгоритмы управления (ПИД регуляторы) недостаточно эффективны в задаче автоматического управления тепловым режимом процесса сушки хлористого калия. Управление тепловым режимом на рассматриваемом производстве производится оперативным персоналом в ручном режиме, путем манипулирования расходом сушильного агента. Необходимость одновременно решать и учитывать множество различного рода задач по управлению процессами в сушильном отделении приводит к тому, что оператор оказывается физически не способным постоянно обеспечивать точное поддержание теплового режима сушки в соответствии с регламентом в условиях колебаний расхода влажного кристаллизата, что снижает качество управления процессом сушки и приводит к перерасходу топливного газа.

Анализ условий и результатов функционирования рассматриваемого производства показал, что типовые алгоритмы не способны обеспечить требуемое качество управления процессом. Требуется применение более совершенных методов и алгоритмов автоматического управления. Обзор литературных источников показывает, что решение существующей задачи можно найти на основе применения алгоритмов, отвечающих интеллектуальным автоматическим системам управления.

Одним из современных подходов к автоматизации сложных, информационно слабо детерминированных технологических процессов, является интеллектуализация системы управления. Интеллектуальными принято считать алгоритмы управления, построенные на основе моделей представления экспертных знаний. Такие алгоритмы способны сохранять работоспособность в условиях нестационарности переменных процесса и неполноты наблюдаемой информации о его состоянии.

Ключевые слова: сушка в кипящем слое, хлористый калий, управление, автоматизация процесса, ПИД, интеллектуальные алгоритмы управления.

Введение

На сегодняшний день большинство промышленных аппаратов сушки оснащены различными контурами автоматического регулирования. В таких контурах широко используются типовые законы регулирования (П, ПИ, ПИД).

В то же время, помимо использования типовых алгоритмов регулирования при автоматизации технологических процессов, в последнее десятилетие все больше промышленных предприятий внедряют в свои системы алгоритмы усовершенствованного управления процессами на основе моделей (Model-based control, MPC). Повышение качества управления аппаратами сушки также решается и за счет использования более метрологически совершенных датчиков и анализаторов [1].

Несмотря на высокий уровень автоматизации в промышленности, сегодня нередко можно встретить неавтоматизированные или полуавтоматизированные технологические процессы, управляемые оперативным персоналом в ручном режиме. Такие процессы принято считать «сложными», так как они чаще всего характеризуются наличием нелинейных связей между технологическими переменными, нестационарностью, стохастичностью и влиянием множества ненаблюдаемых возмущений.

Технологический процесс сушки хлористого калия в печи кипящего слоя

Одним из «сложных» технологических процессов является широко распространенный в химической, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности, процесс сушки сыпучих материалов в аппаратах кипящего слоя (КС). В рассматриваемой работе объектом управления является технологический процесс сушки хлористого калия в печи КС на калийном предприятии.

Процесс сушки хлористого калия заключается в удалении влаги из материала, который находится в псевдооживленном состоянии, путем ее испарения при непосредственной передаче тепла материалу потоком горячего воздуха, поступающего из топочной камеры через газораспределительную решетку и отвода образующихся паров (см. рис. 1).

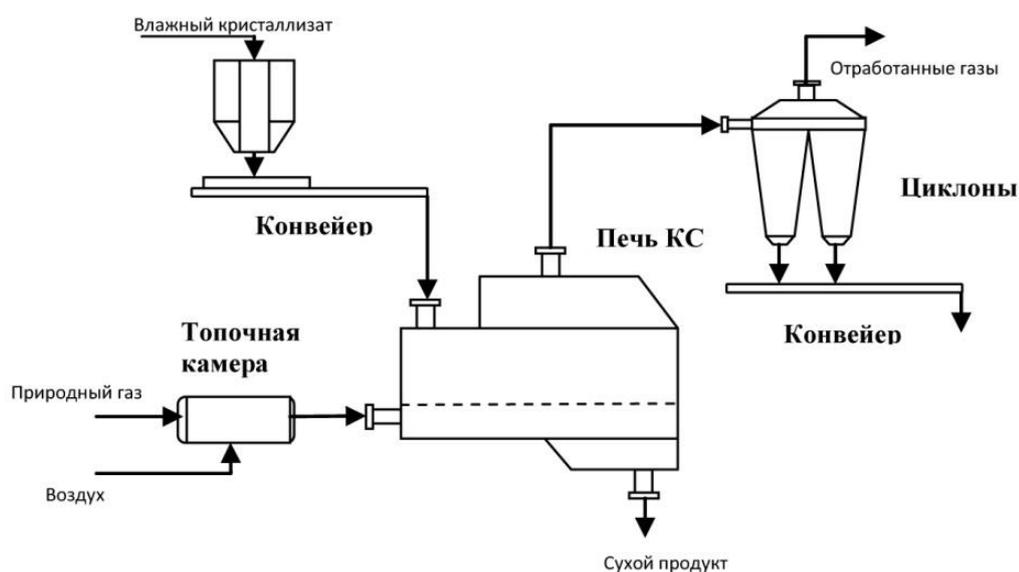


Рис.1 - Схема процесса сушки в кипящем слое

Влажный хлористый калий переходит в состояние псевдооживления (кипящий слой) за счет создания требуемого перепада давления между нижней и верхней частями аппарата печи КС, конструкция которого может быть различной. В нижнюю часть аппарата под давлением подается поток нагретого сушильного агента. Из верхней части аппарата отбирается влажный поток отработанных дымовых газов вместе с пылевой фракцией продукта.

Традиционные подходы к автоматизации процессов сушки в режиме кипящего слоя

Традиционно при автоматизации процессов сушки в печах КС используют два способа автоматического управления процессом: посредством изменения расхода влажного материала перед аппаратом и изменением расхода сушильного агента.

При использовании первого способа между сушилкой и предыдущим технологическим аппаратом необходимо наличие промежуточного бункера, что нежелательно, а часто и просто недопустимо (из-за тенденции влажного материала к слипанию и отвердеванию).

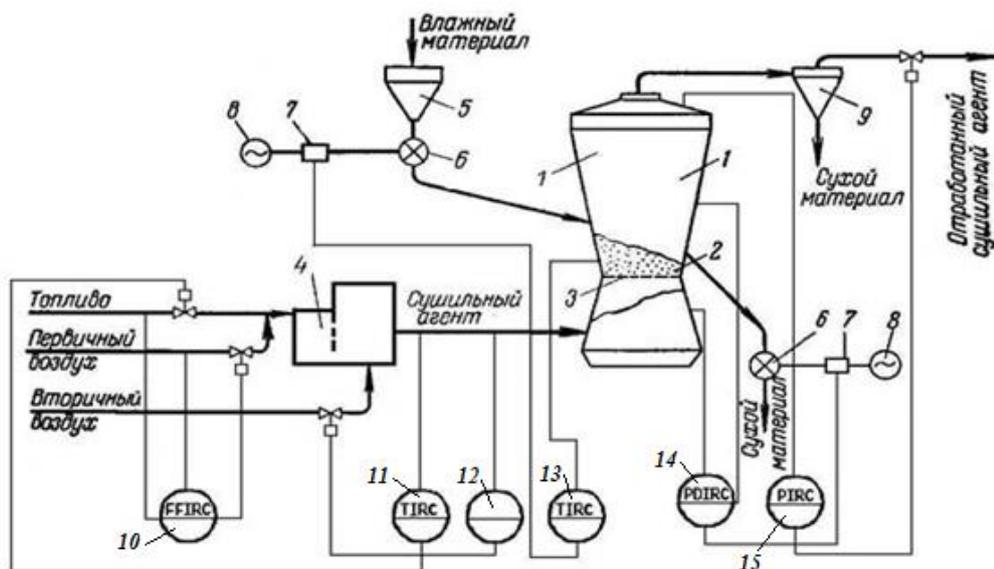


Рис.2 - Схема автоматического управления работой сушилки КС изменением расхода влажного кристаллизата на входе в аппарат: 1 — сушилка; 2 — кипящий слой; 3 — решетка; 4 — топка; 5 — промежуточный бункер; 6 — питатели; 7 — вариаторы; 8 — электродвигатели; 9 — циклон; 10 – регулятор соотношения расхода первичного воздуха к расходу топлива; 11 – регулятор температуры сушильного агента (расход топлива); 12 – регулятор температуры сушильного агента (расход вторичного воздуха); 13 – регулятор температуры кипящего слоя (расход влажного сырья перед аппаратом); 14 – регулятор перепада давления в кипящем слое; 15 – регулятор выгрузки сухого продукта из аппарата.

Регулирование уровня слоя обеспечивает определенное время пребывания материала в сушилке и исключает унос частиц высушиваемого материала с сушильным агентом. При этом достигается постоянное гидродинамическое сопротивление слоя и оптимальный аэродинамический режим процесса сушки. Регулирование уровня слоя осуществляется с помощью регулятора перепада давлений под решеткой и в верхней части аппарата; регулирующее воздействие вносится путем изменения расхода высушенного продукта, выгружаемого из сушилки. Регуляторы температуры

слоя и перепада давления 14 воздействуют на вариаторы 7, изменяющие скорость вращения барабанов лопастных питателей 6.

При использовании второго способа регулирования температуры слоя регулирующее воздействие вносится изменением расхода топлива, а температура сушильного агента на входе в сушилку регулируется изменением расхода вторичного воздуха (см. рис. 3).

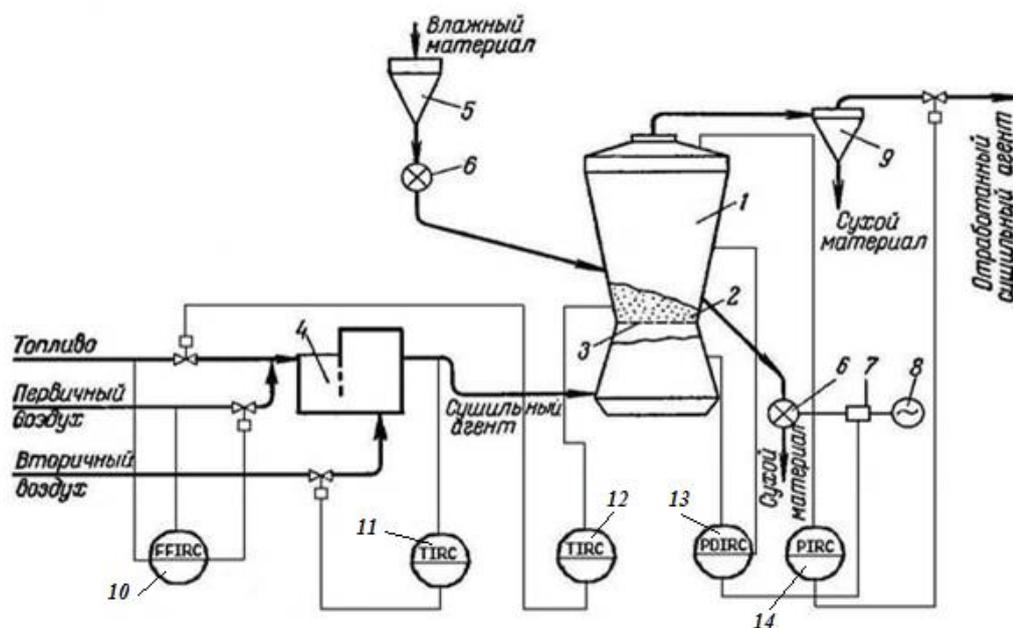


Рис.3 - Схема автоматического управления работой сушилки КС с помощью манипулирования расхода сушильного агента: 1-9 (см. рис. 2); 10 – регулятор соотношения расхода первичного воздуха к расходу топлива; 11 – регулятор температуры сушильного агента (расход вторичного воздуха); 12 – регулятор температуры кипящего слоя (расход топлива); 13 – регулятор перепада давления в кипящем слое; 14 – регулятор давления разрежения в верхней части аппарата КС.

В описанных выше схемах автоматического управления широко используются пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) законы регулирования и их модификации [2].

Анализ объекта управления

При анализе печи КС как объекта управления на рассматриваемом производстве отмечено, что, по согласованному мнению технологического персонала, типовые алгоритмы автоматического управления не способны обеспечить требуемое качество управления тепловым режимом процесса сушки.

Поэтому управление тепловым режимом сушки в печи КС осуществляется оперативным персоналом в ручном режиме. С автоматизированного рабочего места (АРМа) операторы задают значение степени открытия клапана на линии подачи топливного газа для поддержания температуры отработанных дымовых газов на заданном уровне.

Наличие множества различного рода задач по управлению процессами на рассматриваемом объекте приводит к тому, что оператор физически не способен постоянно обеспечивать точное поддержание теплового режима сушки в соответствии с требованиями регламента к степени влажности высушиваемого продукта в условиях колебаний расхода влажного кристаллизата. Это обычно приводит к пересушиванию продукта и, как следствие, к избыточному энергопотреблению процесса сушки.

Низкое качество работы типовых алгоритмов автоматического управления требует переоценки подходов к автоматизации процесса сушки и рассмотрения современных алгоритмов, отвечающих современным требованиям эпохи цифровизации. В работе [3] авторы обращают внимание на эффективность использования интеллектуальных систем автоматизированного управления (ИСАУ) процессами сушки.

Интеллектуальные системы автоматизированного управления

Основная функция ИСАУ, качественно отличающая их от традиционных САУ – это реализация определенных «разумных»,

отвечающих человекоподобным рассуждениям и действиям, направленным на достижение заданной цели в соответствующей предметной области.

В работе [4] авторы под интеллектуальностью системы подразумевают наличие у неё свойств адаптивности [5]. Возможность адаптации к изменяющимся условиям внешней среды при эксплуатации или изменяющимся условиям самой эксплуатации обычно позволяет системе дообучаться и продолжать эффективно функционировать.

Помимо способностей системы к адаптации, ряд исследователей [6] в качестве отличительной характеристики интеллектуальных систем управления выделяет способность функционировать в условиях неполноты имеющейся информации о процессе.

Другие исследователи в качестве характеристики интеллектуальности алгоритмов выделяют использование в алгоритмах представление знаний на основе продукционных правил логического вывода [7].

В настоящей работе в качестве отличительной характеристики интеллектуальности системы управления принята способность ее к адаптации и функционированию в условиях неполноты имеющейся информации.

Структура интеллектуальных систем управления существенно отличается от структуры традиционных систем автоматического управления. В настоящее время сформулированы пять принципов структурной организации интеллектуальных систем управления [6]:

1. Наличие информационного взаимодействия управляющих систем с реальным внешним миром с использованием специально организованных информационных каналов связи;
2. Принципиальная открытость систем с целью повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения;

3. Наличие механизмов прогноза изменений внешнего мира и собственного поведения системы в динамически меняющемся внешнем мире;
4. Наличие у управляющей системы многоуровневой иерархической структуры, построенной в соответствии с правилом IPDI (*Increasing Precision with Decreasing Intelligence*), сформулированным Дж. Аридисом [8].

Интеллектуальные алгоритмы активно внедряются в производственные системы [9,10]. При внедрении ИСАУ можно выделить два качественно отличных друг от друга подхода. Первый подход направлен на поддержку деятельности оперативного персонала по управлению процессом. В этом направлении широкое распространение получили системы поддержки принятия решений (СППР) [11] и экспертные системы (ЭС) [12].

Системы поддержки принятия решений и экспертные системы

СППР и ЭС активно взаимодействуют с человеком через диалог «Лицо, принимающее решение (ЛПР) – компьютер». Следует понимать, что ЭС и СППР – различные системы. СППР предназначены для генерации вспомогательной информации эксперту (в частности, на основе решения задач исследования операций). ЭС – комплексные системы, генерирующие решения для рядовых пользователей с содержательными вербальными пояснениями. В последнее десятилетие в промышленности также внедряются ЭСППР (Экспертные системы поддержки принятия решений) [13]. Их можно считать либо упрощенными ЭС, либо модифицированными СППР.

В литературных источниках не обнаружено информации по опыту реализации экспертных систем, поддерживающих деятельность оперативного персонала по управлению процессом сушки в кипящем слое.

Интеллектуальные алгоритмы управления

Второй подход подразумевает разработку новых или модернизацию, интеллектуализацию существующих алгоритмов автоматического управления, которые будут способны решать и выполнять те или иные слабо детерминированные задачи по управлению процессом без непосредственного участия оператора. В этом направлении широко применяется аппарат нечеткой логики (нечеткое управление), искусственных нейронных сетей и нейро-нечеткие методы [14].

На сегодняшний день известен ряд работ на тему применения интеллектуальных технологий в задачах автоматизации процессов сушки в режиме кипящего слоя.

Так, в целях повышения эффективности сушки риса в режиме КС, в работе [15] авторы исследуют возможность использования моделирования с использованием искусственного интеллекта в задачах прогнозирования показателей качества высушенного зерна. В другом исследовании [16] при решении задачи оптимизации параметров искусственной нейросетевой (ИНС) модели прогнозирования энергетических показателей сушки риса в КС были использованы методы поверхности отклика (RSM) и генетический алгоритм (GA).

Выводы

Анализ особенностей процесса сушки материалов в кипящем слое показал, что выполняемые задачи по управлению слабо детерминированы и на рассматриваемом производстве хлористого калия выполняются, как правило, оперативным персоналом в ручном режиме.

Анализ условий и результатов функционирования рассматриваемого производства показал, что типовые алгоритмы управления не способны обеспечить требуемого качества управления процессом. Требуется

применение более совершенных методов и алгоритмов автоматического управления.

Обзор литературных источников показывает, что решение существующей задачи повышения качества автоматического управления процессом можно найти на основе применения интеллектуальных алгоритмов управления.

Интеллектуальный подход позволяет разработать алгоритмы автоматического управления для решения поставленных задач по управлению в условиях нелинейного взаимовлияния технологических переменных друг на друга, ограниченной наблюдаемости состояния процесса и стохастичности.

Литература

1. Корнилицин Д. К., Дадиев Р. Ю., Шумихин А. Г. Разработка виртуального анализатора остаточной влажности KCl после печи кипящего слоя на калийном предприятии средствами пакета MATLAB //Химия. Экология. Урбанистика. – 2021. – Т. 2021. – С. 247-251.
2. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. - Наука. - Москва. – 1975. - С. 768.
3. Jumah R. Y., Mujumdar A. S., Raghavan V. G. S. 49 Control of Industrial Dryers. P. 22.
4. Душкин Р. В. Интеллектуализация управления техническими системами в рамках функционального подхода //Программные системы и вычислительные методы. – 2019. – №. 2. – С. 43-57.
5. Russell S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd ed.), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, ISBN 0-13-790395-2. P. 10.
6. Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Марков Е. П. Системный анализ процессов химической технологии. Применение метода нечетких множеств. – 1986. – С. 359.



7. Якубов С. Х. Алгоритмические методы построения баз знаний в интеллектуальных системах // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – №. 1 (4). – С. 238-243.
8. Tzafestas S. G. (ed.). Engineering Systems with Intelligence: Concepts, Tools and Applications. Springer Science & Business Media, 2012. Т. 9. Р. 687.
9. Самойлова Е. М. Построение экспертной системы поддержки принятия решения как интеллектуальной составляющей системы мониторинга технологического процесса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18. – №. 2. – С. 128-142.
10. Кузьменко Н. В., Куликов В. В. Модель системы поддержки принятия решений на основании оценки показателей качества сложной технической системы (нефтехимическая промышленность) // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2017. – №. 4 (8). – с. 101-108.
11. Карпушин Е. С. Назначение систем поддержки принятия решений // Современная техника и технологии. – 2014. – №. 6. – С. 15-15. URL: technology.snauka.ru/2014/06/3943.
12. Петросов Д. А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в задачах синтеза технологических процессов при выращивании сельскохозяйственных культур // Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук. – 2018. – С. 173-175.
13. Балыхин М. Г., Благовещенский И. Г., Борзов А. Б. Архитектура и основная концепция создания интеллектуальной экспертной системы контроля качества пищевой продукции // Пищевая промышленность. – 2017. – №. 11. – С. 60-63.



14. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. – 2006. – С. 336.
15. Yi Jin, Yin Jun, Zhang Hongqing, Zhang Jinning, Zhang Zhongjie, Yang Deyong. Parameters Predictions of Paddy Grain Drying Based on Machine Learning. 2021 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). IEEE, 2021. pp. 701-707.
16. Jin Yi, Wai Wong Kok, Yang Deyong, Zhang Zhongjie, Wu Wenfu, Yin Jun. A neural network model used in continuous grain dryer control system. Drying Technology. 2021. pp. 1-22.

References

1. Kornilitsin D. K., Dadiomov R. Yu., Shumikhin A. G. Khimiya. Ekologiya. Urbanistika. 2021. Vol. 2021. P. 247-251.
2. Besekerskiy V. A., Popov E. P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control systems]. Nauka. Moskva. 1975. P. 768.
3. Jumah R. Y., Mujumdar A. S., Raghavan V. G. S. 49 Control of Industrial Dryers. P. 22.
4. Dushkin R. V. Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody. 2019. No 2. pp. 43-57.
5. Russell S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd ed.), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, ISBN 0-13-790395-2. P. 10.
6. Kafarov V. V., Dorokhov I. N., Markov E. P. Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii [System analysis of chemical technology processes. Application of the fuzzy sets method]. Primenenie metoda nechetkikh mnozhestv. 1986. P. 359.
7. Yakubov S. Kh. Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. 2016. No 1 (4). pp. 238-243.



8. Tzafestas S. G. (ed.). Engineering Systems with Intelligence: Concepts, Tools and Applications. Springer Science & Business Media, 2012. Vol. 9. P. 687.
9. Samoylova E. M. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie. 2016. Vol 18. No 2. pp. 128-142.
10. Kuz'menko N. V., Kulikov V. V. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2017. No 4 (8). pp. 101-108.
17. Karpushin E. S. Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. 2014. No. 6. p.p. 15-15. URL: technology.snauka.ru/2014/06/3943.
11. Petrosov D. A. Fundamental'nye i prikladnye razrabotki v oblasti tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk. 2018. pp. 173-175.
12. Balykhin M. G., Blagoveshchenskiy I. G., Borzov A. B. Pishchevaya promyshlennost'. 2017. No 11. pp. 60-63.
13. Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P.. Iskusstvennyy intellekt i intellektual'nye sistemy upravleniya [Artificial intelligence and intelligent control systems]. 2006. P. 336.
14. Yi Jin, Yin Jun, Zhang Hongqing, Zhang Jinning, Zhang Zhongjie, Yang Deyong. 2021 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). IEEE, 2021. pp. 701-707.
15. Jin Yi, Wai Wong Kok, Yang Deyong, Zhang Zhongjie, Wu Wenfu, Yin Jun. Drying Technology. 2021. pp. 1-22.