

УДК 633.31:664.8

DOI 10.33814/AFP-2222-5366-2026-2-84-105

ПРОЦЕССЫ СУШКИ ЗЕЛЕННОЙ МАССЫ ЛЮЦЕРНЫ*

С. В. Брагинец^{1,2}, доктор технических наук
О. Н. Бахчевников¹, кандидат технических наук
Д. А. Кузьменко¹, аспирант
Д. А. Максак¹, аспирант

¹*Аграрный научный центр «Донской»*
347740, Россия, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3
oleg-b@list.ru

²*Донской государственный технический университет*
344000, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

DRYING PROCESSES OF ALFALFA GREEN BIOMASS (REVIEW)

S.V. Braginetz^{1,2}, Doctor of Engineering Sciences
O.N. Bakhchevnikov¹, Candidate of Engineering Sciences
D.A. Kuzmenko¹, Postgraduate
D.A. Maksak¹, Postgraduate

¹*Agricultural Research Centre Donskoy*
347740, Russia, Rostov Region, Zernograd, Nauchnyy Gorodok St., 3
oleg-b@list.ru

²*Don State Technical University*
344000, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1

Обзор посвящен исследованию процессов обезвоживания зеленой массы люцерны (*Medicago sativa* L.), обусловленных необходимостью снижения ее начальной влажности (70–80 %) до уровня 12–15 % для предотвращения потерь питательных веществ. Цель работы — обобщение и анализ закономерностей влагопереноса в тканях люцерны для разработки энергоэффективных технологий ее сушки. Методология обзора основана на систематическом анализе научной литературы (2015–2025 гг.) из баз eLIBRARY, Google Scholar, ScienceDirect по протоколу PRISMA-ScR. Рассмотрены формы содержания воды в тканях люцерны: свободная (85–90 %), физико-химически связанная (10–15 %) и химически связанная влага, определяющие энергетику процесса обезвоживания. Проанализированы механизмы влагопереноса на физиологической (до 40 % влажности) и биохимической (40–15 %) стадиях, включая межклеточную, внутриклеточную и трансмембранную диффузию. Выделены три кинетических периода сушки: период постоянной скорости (испарение свободной воды) и два периода падающей скорости (удаление связанной воды). Особое внимание уделено проблеме асинхронной сушки листьев и стеблей, приводящей к пересушиванию листьев

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ФБГНУ «Аграрный научный центр «Донской» «Технология получения белково-витаминной диспергированной кормовой добавки из вегетативной массы бобовых культур в ранних фазах созревания» (FNFN-2026-0002).

и разрушению питательных веществ. Решение проблемы требует предварительного механического воздействия на стебли для выравнивания кинетических кривых, а также подбора адаптивных режимов сушки. Проанализировано развитие математического моделирования процесса сушки люцерны — от эмпирических моделей тонкого слоя к комплексным диффузионным моделям сопряженного тепло- и массопереноса, адаптированным для конкретных сушильных аппаратов. Отмечена перспектива интеграции искусственного интеллекта и CFD-моделирования для оптимизации режимов сушки с учетом сохранения качества листовой фракции.

Ключевые слова: люцерна (*Medicago sativa* L.), зеленая масса, сушка, обезвоживание, влагоперенос, свободная влага, связанная влага, моделирование, кормопроизводство.

Review examines the dehydration processes of alfalfa (*Medicago sativa* L.) green biomass, driven by the necessity to reduce its initial moisture content (70–80%) to levels 12–15% to prevent nutrient losses. The objective is to summarize and analyze the moisture transfer regularities in alfalfa tissues for the development of energy-efficient drying technologies. The review methodology is based on a systematic analysis of scientific literature (2015–2025) from eLIBRARY, Google Scholar, and ScienceDirect databases following the PRISMA-ScR protocol. The paper discusses the forms of water present in alfalfa: free water (85–90%), physicochemically bound water (10–15%) and chemically bound water, which determine the energy requirements of the dehydration process. The mechanisms of moisture transfer during the physiological (up to 40% moisture) and biochemical (40–15%) stages are analyzed, including intercellular, intracellular, and transmembrane diffusion. Three kinetic drying periods are identified: the constant rate period (free water evaporation) and two falling rate periods (bound water removal). Particular attention is given to the problem of asynchronous drying of leaves and stems, which leads to overdrying of leaves and degradation of nutrients. Addressing this issue requires preliminary mechanical treatment of the stems to equalize drying kinetics, as well as the selection of adaptive drying regimes. The development of mathematical modeling of the drying process is analyzed – from empirical thin-layer models to comprehensive diffusion models of coupled heat and mass transfer adapted for drying equipment. The prospect of integrating artificial intelligence and CFD modeling to optimize drying regimes while preserving leaf fraction quality is highlighted.

Keywords: alfalfa (*Medicago sativa* L.), green biomass, drying, dehydration, moisture transfer, free moisture, bound moisture, modeling, feed production.

Введение. Люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) является одной из наиболее ценных многолетних бобовых трав, широко распространенной в кормопроизводстве благодаря исключительным кормовым качествам [1]. Зеленая масса люцерны характеризуется высоким содержанием протеина, сбалансированным аминокислотным составом, богатым содержанием витаминов и минеральных элементов, что обеспечивает ее высокую питательную ценность для сельскохозяйственных животных [2; 3].

Ключевой проблемой при заготовке кормов из люцерны является чрезвычай-

но высокая начальная влажность зеленой массы, которая в фазе бутонизации достигает 70–80 % [4; 5]. При такой влажности свежескошенная люцерна непригодна для длительного хранения вследствие интенсивного дыхания тканей, микробиологических процессов гниения и самосогревания, что приводит к катастрофическим потерям питательных веществ [6; 7]. Обеспечение безопасной влажности конечного продукта (12–15 %) требует удаления значительного количества влаги, что обуславливает необходимость применения эффективных технологий сушки [8].

В настоящее время для сушки зеленой массы люцерны применяют различные методы: естественная сушка (провяливание в поле), искусственная сушка горячим воздухом (конвективная), солнечная сушка, микроволновая сушка, сушка с применением систем активной вентиляции и комбинированные технологии [9]. Однако существующие способы обезвоживания обладают существенными недостатками. Традиционная естественная сушка занимает продолжительное время (до двух–трех суток и более), сопровождаясь значительными потерями листьев, содержащих основную массу питательных веществ, и сильно зависит от погодных условий [10]. Искусственная сушка горячим воздухом, несмотря на высокую производительность, характеризуется значительной энергоемкостью и риском разрушения термолабильных питательных веществ [11; 12].

При температуре сушки выше 50–60 °С наблюдается денатурация белков и развитие реакции Майяра, приводящей к снижению доступности аминокислот (особенно лизина) и ухудшению переваримости корма [13]. При нагреве выше 60 °С происходит разрушение термолабильных питательных веществ — витаминов, каротиноидов и антиоксидантов, что приводит к снижению кормовой ценности [14; 15]. Солнечная сушка и сушка с использованием тепловых насосов хотя и обеспечивают экономию энергии (до 25 % по сравнению с традиционными методами), но остаются чувствительными к климатическим факторам и требуют значительных капитальных вложений [16].

Критическим ограничением при разработке новых технологий сушки явля-

ется недостаточный учет механизмов влагопереноса в тканях люцерны. Вода в растительном сырье существует в различных формах: свободная (85–90 % от общей влаги), физико-химически связанная (10–15 %) и химически связанная [9; 17]. Процесс обезвоживания протекает в три стадии: период постоянной скорости (испарение свободной воды), первый период падающей скорости (испарение связанной воды с поверхности) и второй период падающей скорости (удаление глубинной связанной воды), причем каждая стадия характеризуется различными механизмами влагопереноса [18]. Большое значение имеет асинхронность сушки фракций люцерны: листья, имеющие большую поверхность и тонкую структуру, теряют влагу значительно быстрее, чем стебли с восковым кутикулярным слоем, что приводит к чрезмерной сушке листьев и разрушению питательных веществ [19].

Сушка люцерны — это сложный комплекс явлений. Глубокое понимание процессов переноса влаги, тепла и массы, происходящих во время обезвоживания люцерны, имеет решающее значение для улучшения качества кормов и повышения эффективности сушки.

Несмотря на важность проблемы, комплексные научные исследования, посвященные закономерностям процессов обезвоживания зеленой массы люцерны с учетом форм содержания воды в тканях и кинетики влагопереноса, представлены недостаточно полно. Отсутствие систематизированной информации о механизмах дегидратации затрудняет обоснование параметров новых технологий и конструктивных решений сушильных установок, адаптированных к био-

логическим особенностям люцерны. Существующая информация фрагментарна, не позволяет в полной мере обосновать энергоэффективные, ресурсосберегающие и сохраняющие качество технологии, учитывающие специфические физико-химические свойства растения. Это создает значительный научный пробел, препятствующий инновационному развитию отрасли, что и определяет актуальность настоящего исследования.

Цель исследования — обобщение и анализ информации о закономерностях процессов, протекающих в зеленой массе люцерны при ее обезвоживании, для последующего использования при разработке новых технологий и технических средств для ее сушки.

Материалы и методы. Подготовка настоящего обзора осуществлялась поэтапно и охватывала ряд последовательных процедур: инициация целенаправленного информационного поиска с последующим отбором научных источников, извлечение релевантных сведений из проанализированных материалов, их структурирование, а также критическая оценка и синтез выявленных закономерностей [20; 21].

Информационный поиск проводили в ведущих реферативных базах данных и научных платформах, включая отечественную систему eLIBRARY и международные ресурсы Google Scholar, ScienceDirect, Springer Link, а также на сайтах крупных издательств, в частности MDPI. В поле внимания попадали публикации следующих типов: статьи, содержащие первичные исследовательские данные (Article), аналитические обзоры (Review), а также разделы из научных монографий (Chapter). Для повышения

специфичности и точности результатов поисковые стратегии конструировали с использованием ключевых терминов и их различных лексических сочетаний на русском и английском языках.

Отбор материалов и систематизацию обзорного поля литературы проводили в соответствии с поэтапной схемой, адаптированной из протокола PRISMA-ScR [22]. Непосредственный анализ содержания отобранных публикаций выполняли с применением методологических подходов, предложенных W. Mengist [23], что обеспечило системность и несмещенность исследовательской процедуры.

Критерии включения публикаций в корпус анализа определялись их тематическим соответствием целям исследования и научной ценностью. При ранжировании источников учитывали индекс цитируемости; исключение составляли лишь недавно вышедшие работы, для которых показатель цитирования еще не сформировался. Для максимизации охвата литературы осуществляли анализ библиографических списков уже отобранных статей с целью выявления дополнительных релевантных источников.

Хронологические рамки обзора охватывают период 2015–2025 гг. Однако в анализ включали и более ранние публикации при условии недостаточной или отсутствующей современной научной информации по отдельным аспектам рассматриваемой тематики.

Реализация многоуровневой стратегии поиска, отбора и анализа научной литературы позволила сформировать целостную картину актуального состояния изучаемой проблематики, а также идентифицировать приоритетные тенденции

и векторы развития исследований в данной предметной области.

Результаты. *Формы воды в люцерне.* Ткани листьев и стеблей люцерны являются ненасыщенным влагосодержащим материалом с капиллярной структурой. Входящие в ее состав гидрофильные вещества, прежде всего структурные полисахариды (пектины и целлюлоза), позволяют адсорбировать значительные количества воды — до 85 % [24]. Ключевые гидрофильные компоненты распределены по клеточным стенкам.

Распределение влаги в тканях люцерны является неоднородным. Вода, доступная для удаления в процессе сушки, подразделяется на свободную (85–90 %) и связанную (10–15 %) [25]. Свободная вода, находящаяся в макропорах, таких как клеточные полости, межклеточные пространства и сосуды, наиболее легко удаляется при сушке. Она в основном находится внутри клеток, включая вакуоль и цитоплазму, а также в сосудах проводящей системы и межклеточных пространствах [9]. Это наиболее легко удаляемая при сушке влага — ее давление пара практически равно давлению пара чистой воды при тех же температурах, поэтому свободная вода является основным компонентом испарения на начальной стадии сушки [9; 26].

Связанная вода подразделяется на физико-химически связанную и химически связанную [27].

Физико-химически связанная вода — это молекулы воды, прочно связанные с сухим веществом тканей люцерны [26]. Она подразделяется на адсорбционно связанную воду, закрепляющуюся на поверхности частиц и проникающую во внутренние структуры клеток, и осмоти-

чески связанную воду, диффундирующую через клеточные стенки под действием градиентов концентрации. При этом они способны адсорбироваться на поверхностях или проникать через поверхности внутрь. Ее давление пара значительно ниже, чем у чистой воды при той же температуре. По сравнению со свободной водой, удаление физико-химически связанной требует значительно больших энергетических затрат [27].

Химически связанная вода стабилизируется связями с органическими соединениями, поэтому ее удаление требует значительно больше энергии, чем удаление свободной и физико-химически связанной воды [24]. Химически связанная вода представляет собой молекулы, соединенные с органическими веществами внутри тканей люцерны, такими как белки, крахмал и жиры, посредством химических связей и межмолекулярных сил. Молекулы воды в химически связанной форме поддерживают строгое количественное соотношение с сухим веществом и не участвуют в химических реакциях внутри частиц люцерны [24]. Ее удаление может повредить тканевую структуру растения, вызвав денатурацию белков и разрушение клеточных стенок, что нецелесообразно [28]. Следовательно, удаление химически связанной воды в процессе сушки люцерны не требуется.

Классификация форм влаги определяет энергетическую структуру процесса сушки и объясняет нелинейный характер кинетики обезвоживания (табл. 1).

Процессы влагопереноса в тканях люцерны. Происходящее при обезвоживании перемещение воды из внутренних тканей люцерны к ее поверхности, где

она затем испаряется в воздух, представляет собой сложный процесс, который

делится на физиологическую и биохимическую стадии.

1. Формы воды в тканях люцерны и их технологическое значение при сушке

Форма воды	Доля / характер содержания	Локализация в тканях	Прочность связи	Особенности удаления при сушке	Технологическое значение
Свободная вода	85–90 % от общей влаги	Вакуоли, цитоплазма, сосуды, межклеточные пространства	Слабая	Удаляется на начальной стадии (период постоянной скорости)	Определяет высокую интенсивность начального обезвоживания
Физико-химически связанная вода	10–15%	Клеточные стенки, внутриклеточные структуры	Средняя	Удаляется в период падающей скорости, требует повышенных энергозатрат	Формирует основную долю влаги на поздних стадиях
Адсорбционно связанная вода	Часть физико-химически связанной	Поверхности частиц и клеточных структур	Прочная	Удаляется медленно при снижении влажности	Обуславливает снижение скорости сушки на поздних стадиях
Осмотически связанная вода	Часть физико-химически связанной	Внутренние структуры клеток	Прочная	Требует значительного градиента концентрации	Влияет на продолжительность обезвоживания
Химически связанная вода	Прочно связана с сухим веществом	Связь с белками, углеводами, липидами	Очень высокая	Практически не удаляется без разрушения структуры	Не является объектом удаления при сушке

Физиологическая стадия обезвоживания длится от момента скашивания люцерны до снижения ее влажности примерно до 40 %. При этом клетки растения сохраняют жизнеспособность и метаболическую активность, в которой преобладает катаболизм. Дыхательный метаболизм преобразует крахмал в моно- и дисахариды, одновременно расходуя простые сахара, а белки разлагаются до водорастворимых азотистых соединений [9; 29].

Биохимическая стадия начинается

при снижении влажности до 40 % и продолжается до достижения влажности около 15 % [8; 16]. Эта стадия обезвоживания характеризуется гибелью клеток и прекращением дыхания и транспирации. На этой стадии преобладает ферментативное разложение: ограниченное разрушение макромолекулярных углеводов (крахмала, целлюлозы) и значительное разложение растворимых сахаров, что сопровождается потерей воды и снижением активности ферментов, минимизируя потери питательных веществ [30].

Свободная вода из тканей люцерны в основном испаряется через устьица, сосудистую систему и межклеточные пространства под воздействием градиента водного потенциала, что приводит к относительно высокой скорости обезвоживания [8]. Значительные различия во влажности между внутренними тканями и местами испарения влаги создают значительный градиент водного потенциала от сердцевины к поверхности [8; 31]. Ключевыми факторами сопротивления на этом этапе являются сопротивление клеточной стенки, полупроницаемость клеточных мембран, размер и извилистость межклеточных пространств, восковой кутикулярный слой на эпидермисе стебля и толщина тканей [9; 27].

Пути переноса жидкой воды и пара в тканях люцерны различаются.

При переносе жидкой воды различают межклеточную и внутриклеточную диффузию, сосудистый и трансмембранный транспорт.

В ходе межклеточной диффузии вода диффундирует через пространства между клетками. При внутриклеточной миграции перемещение воды осуществляется посредством цитоплазматического тока и диффузии [24].

Сосудистый транспорт происходит в живых тканях и сразу после скашивания, когда сосуды ксилемы кратковременно поддерживают перемещение воды под действием капиллярных сил, но с ограниченной эффективностью и длительностью (менее 30 мин) [9].

Трансмембранный транспорт влаги осуществляется по трем основным путям (рис. 1): апопластическому, при котором вода движется по клеточным стенкам и межклеточникам; симпластическому, при котором перенос происходит через цитоплазму соседних клеток, соединенных плазмодесмами; и трансцеллюлярному, при котором вода последовательно проходит через клеточные мембраны [9; 25].

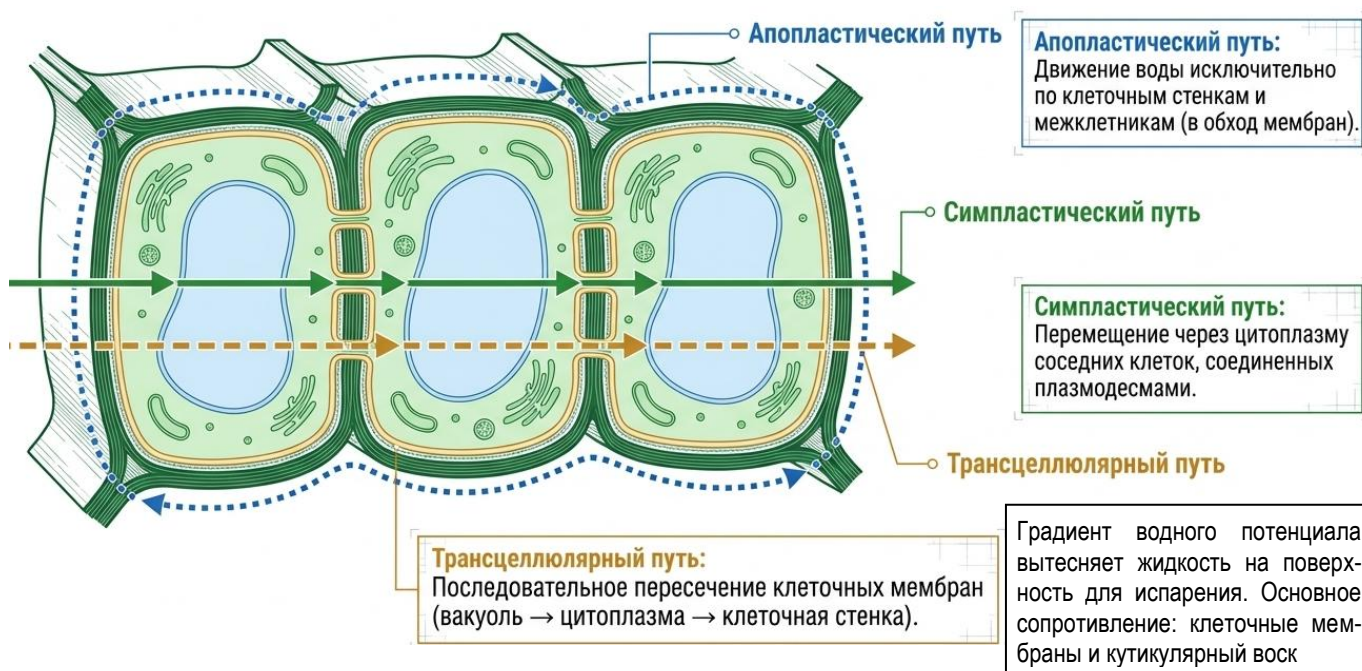


Рис. 1. Пути трансмембранного транспорта воды в растительной ткани

Перенос водяного пара в тканях люцерны происходит двумя путями: внутренняя диффузия и поверхностное испарение [32].

Внутренняя диффузия водяного пара происходит, когда при повышенной температуре внутри тканей и наличии температурного градиента влага может испаряться в более нагретых зонах (более 45 °С) и затем диффундировать в виде пара в более холодные зоны или области с пониженным давлением [25]. Это явление наиболее выражено при высокотемпературной сушке.

Поверхностное испарение происходит на верхнем и нижнем эпидермисе листьев и на поверхности стеблей, контактирующих с воздухом [8; 9]. Оно определяется дефицитом давления пара между поверхностью растения и окружающим воздухом, увеличение которого усиливает движущую силу испарения. На поверхности растения образуется относительно неподвижный аэродинамический пограничный слой, поэтому влага на границе фаз переходит в пар, поглощая скрытую теплоту [27]. Этот пар должен пройти через пограничный слой посредством диффузии и конвективного переноса, прежде чем попасть в основной воздушный поток.

Общий путь влагопереноса в тканях люцерны под действием градиента концентрации следующий: вода в жидкой форме перемещается к поверхности через цитоплазму, мембраны и межклеточные пространства, достигнув поверхности клеток, она поглощает тепловую энергию и испаряется, а образовавшийся водяной пар диффундирует через микроскопические устьица или поры кутикулы через аэродинамический пограничный

слой, затем попадает в основной воздушный поток и уносится им.

Анализ закономерностей потери влаги в тканях люцерны. Сушка люцерны удаляет влагу посредством подвода к ней тепла. Будучи пористым материалом с взаимосвязанными порами и капиллярами и влагонепроницаемым кутикулярным слоем, ткань люцерны теряет воду главным образом через устьица, межклеточные пространства и сосудистую систему посредством теплопереноса и конвекции [33]. С точки зрения процессов переноса это представляет собой тепло- и массообмен как внутри материала, так и вне его, что связано с двумя видами сопротивления: тепловое сопротивление и сопротивление массопереносу [8].

Обезвоживание люцерны протекает неравномерно и обычно имеет четко выраженные стадии (по классификации W. Zhang, et al.): период постоянной скорости сушки, первый период снижения скорости и второй период снижения скорости (рис. 2) [9].

Период постоянной скорости в основном связан с испарением свободной воды и характеризуется быстрой и относительно постоянной скоростью дегидратации со стабильной потерей влаги в единицу времени. На этом этапе испарение происходит в основном из свободной воды на поверхности растения и внутренней свободной воды, находящейся очень близко к поверхности [9]. Поверхности люцерны остаются постоянно насыщенными из-за того, что скорость внутренней диффузии жидкости соответствует скорости испарения с поверхности или превышает ее. Преобладает поверхностное испарение, причем скорость высыхания в основном зависит

от внешних условий: температуры окружающей среды, относительной влажности, скорости воздуха и скорости вентиляции. Более высокая температура, более низкая влажность, большая скорость

ветра и интенсивный воздухообмен ускоряют скорость высыхания [25]. Минимальное сопротивление внутреннему транспорту обеспечивает быстрое восполнение влаги на поверхности.

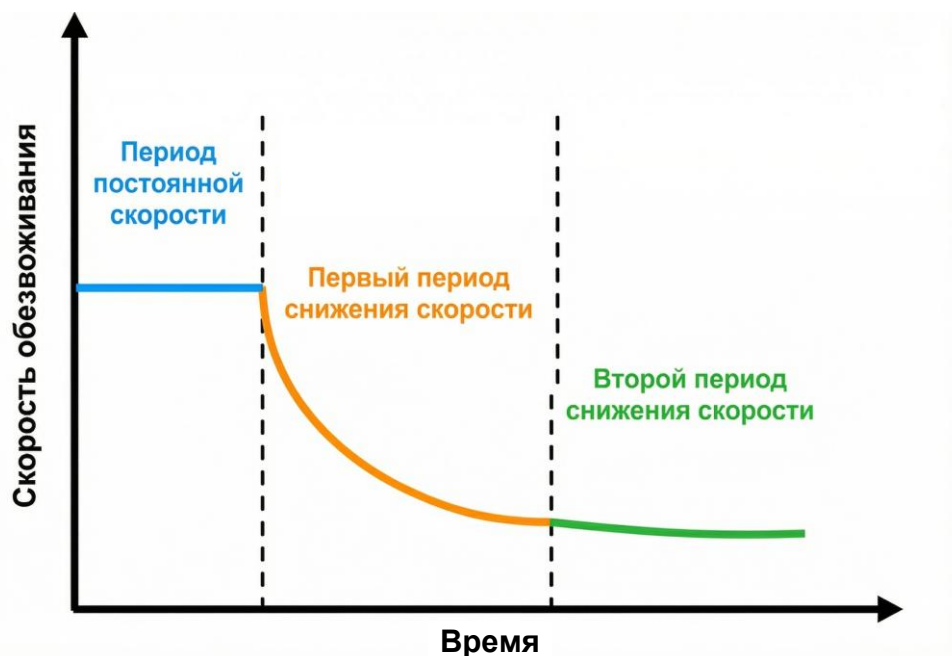


Рис. 2. Изменение скорости обезвоживания люцерны в процессе сушки (по классификации W. Zhang, et al. [9] и A.S. Mujumdar [24])

В первом периоде снижения скорости сушки растения люцерны происходит заметное снижение скорости удаления влаги, которая продолжает уменьшаться с течением времени [9]. К этому моменту свободная вода на поверхности в основном уже испарилась, и поверхность тканей перестает быть полностью влажной. Фронт испарения смещается внутрь материала, и лимитирующим фактором процесса становится внутренняя диффузия влаги, определяемая возрастающим сопротивлением клеточных стенок, клеточных мембран и межклеточных пространств тканей [8]. Влияние внешних условий сушки (температура, влажность, вентиляция, скорость ветра) на скорость обезвоживания ослабевают,

тогда как определяющее значение приобретают физические характеристики растения, такие как строение стеблей и листьев, толщина тканей, наличие воскового слоя и состояние устьиц [34]. Данный этап отличается значительной продолжительностью и составляет основную часть всего процесса сушки. В ходе этого этапа происходит деградация хлорофилла и смена окраски (от темно-зеленой к светло-зеленой), затвердевание стеблей, усиливается ломкость листьев [35].

Во втором периоде скорость обезвоживания асимптотически снижается по мере приближения значения влажности к равновесной. Скорость на данном этапе определяется главным образом свой-

ствами материала по связыванию влаги и равновесной относительной влажностью окружающего воздуха [8]. На этом этапе удаляется преимущественно связанная вода, которая прочно удерживается тканями растения и требует значительно большей энергии для разрушения химических связей, в частности водородных связей между молекулами воды и структурой материала [9]. Одновременно удлиняется путь диффузии влаги и возрастает сопротивление переносу, поскольку вода должна перемещаться из более глубоких, мелких и плотных структур. Внутреннее сопротивление диффузии влаги и сила ее связи с материалом становятся основными факторами, определяющими скорость процесса обезвоживания. Чрезмерно высокая температура на этом этапе может привести к термическим повреждениям, таким как реак-

ция Майяра, обугливание и потеря питательных веществ. В этот период зеленая масса люцерны приобретает типичные свойства сена: желтовато-коричневую или светло-коричневую окраску, хрупкие стебли, склонные к излому, и листья, легко отделяющиеся от стеблей.

Водная активность является ключевым параметром при выборе и обосновании режимов сушки люцерны и представляет собой показатель содержания свободной воды в продукте, отражающий энергетическое состояние воды [24; 36]. Нелинейная зависимость между влагосодержанием и водной активностью, формирующая S-образную изотерму десорбции, указывает на существование различных форм связи воды в растительном сырье при разных уровнях влажности, как показано на рис. 3 [9; 36].

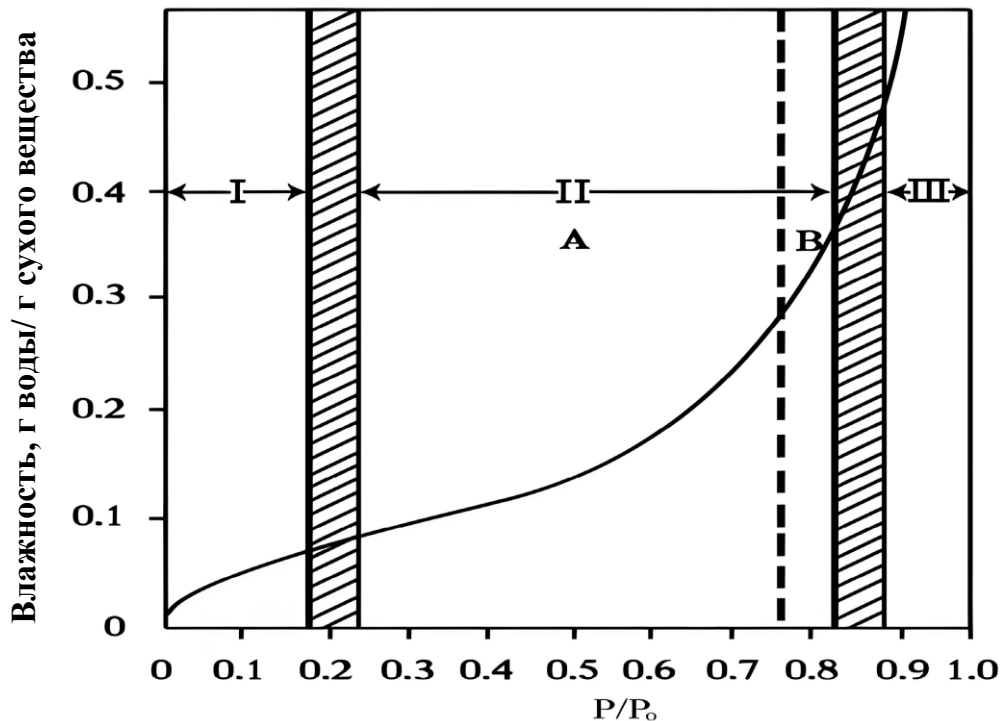


Рис 3. Обобщенная изотерма десорбции для сегмента продукта с низким содержанием влаги при температуре 20 °C (по W. Zhang, et al. [9]): P/P_0 — отношение парциального давления водяного пара в окружающей среде к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре

Изотермы десорбции листьев люцерны соответствуют зоне II на рис. 3, в которой вода находится в состоянии многослойной адсорбции, образуя переходную форму между связанной и свободной влагой [9]. Изотермы десорбции верхних, средних и прикорневых частей стебля люцерны имеют сходный характер при различных температурах, при этом отсутствуют выраженные точки перегиба, в которых касательная пересекает саму кривую. Температура существенно влияет на изотермы десорбции: при повышении температуры кривые для стеблей и листьев люцерны последовательно смещаются вправо и вниз, сохраняя при этом сходную форму [9; 26].

Это означает, что в процессе удаления влаги из люцерны основная ее часть находится в форме многослойно адсорбированной воды с умеренной энергией связи, при которой доминируют взаимодействия между молекулами воды, а не с тканями материала [8; 9]. С технологической точки зрения это указывает на то, что сушка протекает с падающей скоростью, ограниченной внутренней диффузией влаги, а не внешними условиями тепло- и массообмена, вследствие чего интенсивность обезвоживания постепенно снижается по мере уменьшения влагосодержания [26]. Требуемые энергозатраты остаются значительными, но ниже, чем при удалении прочно связанной воды. При этом материал становится чувствительным к режимам сушки, поскольку чрезмерное повышение температуры или времени воздействия может привести к деградации термолабильных компонентов (в частности каротиноидов и белков), тогда как недостаточная интенсивность процесса — к сохранению

повышенной активности воды и риску биохимических изменений [37]. Таким образом, для люцерны в зоне II оптимальными являются режимы обезвоживания с контролируемой температурой и интенсификацией внутреннего массопереноса (например, за счет диспергирования, перемешивания или комбинированных методов сушки), обеспечивающие баланс между скоростью удаления влаги и сохранением качества продукта.

Особенности процесса обезвоживания фракций люцерны. Следует обязательно учитывать, что зеленая масса люцерны состоит из двух различных фракций. Ее тонкие листья имеют большую площадь поверхности, что приводит к чрезвычайно быстрой потере воды на этапе постоянной скорости [34]. Однако стебли люцерны относительно толстые и обладают восковым кутикулярным слоем, что приводит к очень медленной потере воды на первом и, особенно, втором этапах падающей скорости сушки [34; 35]. Эти особенности фракции люцерны являются основной причиной чрезмерной сушки листьев и потери питательных веществ, что представляет собой ключевую техническую проблему обезвоживания люцерны. Несинхронная сушка стеблей и листьев является критическим фактором, влияющим на качество готового корма из люцерны, включая содержание белка и каротина (табл. 2).

Для повышения эффективности обезвоживания люцерны необходимо обеспечить выравнивание скорости сушки стеблей и листьев, поскольку именно различие в кинетике обезвоживания этих фракций является причиной пересушивания листьев и значительных потерь содержащихся в них питательных ве-

ществ. Механическая обработка (измельчение или плющение) заключается в повреждении стеблей с целью разрушения воскового кутикулярного слоя и частичного разрушения сосудистых тканей, что способствует ускоренному

выходу влаги из внутренних слоев растения. Без механической обработки стеблей листья высыхают значительно быстрее, становятся хрупкими и осыпаются при последующих технологических операциях.

2. Сравнительная характеристика свойств листьев и стеблей люцерны и их влияние на процесс сушки

Параметр	Листья люцерны	Стебли люцерны	Влияние на процесс сушки
Морфологические особенности	Тонкие, большая удельная поверхность, тонкая кутикула	Толстые, мощный восковой кутикулярный слой, плотная структура	Основная причина асинхронности сушки
Скорость потери влаги	Очень высокая (превышает скорость сушки стеблей в 3 раза)	Низкая, особенно в первом и втором периодах падающей скорости	Пересушивание листьев при достижении безопасной влажности стеблей; механические потери листовой фракции до 20–30 %
Доминирующий период сушки	Период постоянной скорости (быстрое испарение свободной воды)	1-й и, особенно, 2-й периоды падающей скорости (внутренняя диффузия связанной воды)	Листья достигают равновесной влажности значительно раньше стеблей
Сопротивление массопереносу	Низкое (много устьиц, тонкие ткани)	Высокое (восковой слой, длинный путь диффузии)	Необходимость предварительного плющения/измельчения стеблей для выравнивания кинетики
Содержание питательных веществ	Высокая концентрация протеина, каротиноидов, витаминов, антиоксидантов	Ниже (основная масса питательных веществ в листьях)	Потери листовой фракции → снижение общей кормовой ценности (белок, каротин)
Изменения при пересушивании	Быстрое затвердевание, повышенная ломкость, осыпание	Медленное затвердевание, сохраняют структуру дольше	Пересушивание листьев приводит к реакции Майяра и денатурации белков раньше, чем влажность стеблей достигает 12–18 %
Рекомендуемые меры коррекции	Контроль температуры и времени на поздних этапах	Механическая обработка (плющение, измельчение)	Комбинированные технологии + фракционное разделение

Моделирование процесса сушки люцерны. В процессе сушки растительного сырья, такого как люцерна, эффективность сушки и качество конечного про-

дукта тесно связаны с распределением температуры и влаги внутри материала [8]. Процесс тепло- и массообмена при сушке люцерны заключается в удалении

влаги за счет теплового потока и определяется множеством факторов, включая температуру сушки, градиент влажности и конструкцию сушильного оборудования. Изучение механизмов сушки традиционными экспериментальными методами затруднено и не всегда обеспечивает достаточную точность. С развитием вычислительной техники все большее число исследователей применяет численные методы и программное обеспечение для моделирования течения жидкости, теплообмена и массообмена в процессах сушки пищевых продуктов [9]. Численное моделирование позволяет глубже понять распределение температуры и влажности в люцерне при заданных технологических параметрах и тем самым раскрыть механизм переноса влаги.

Моделирование сушки люцерны развивается по нескольким взаимосвязанным направлениям: эмпирическое описание кинетики тонкого слоя, термодинамическое описание равновесной влажности и десорбционных изотерм, механистическое моделирование сопряженного тепло- и массообмена, а также аппаратно-ориентированные модели для конкретных типов сушилок.

Наиболее ранний и до сих пор широко применяемый подход основан на моделях десорбции и равновесной влажности. Это механистические модели, основанные на законах диффузии (в частности, законе Фика) и учитывающие внутреннее сопротивление массопереносу, эффективный коэффициент диффузии влаги и формы связи воды в тканях.

В важной работе А. Arabhosseini десорбционные изотермы листьев и стеблей люцерны были определены отдельно

в диапазоне 25–70 °С при относительной влажности 5–90 %, после чего данные сопоставляли с уравнениями различных моделей, причем наиболее подходящей оказалась модифицированная модель Halsey [26]. А. Arabhosseini математически доказал, что из-за морфологических различий фракций применение единой изотермы для всей зеленой массы приводит к существенным погрешностям в расчетах. Исследование подтвердило различия в поведении стеблей и листьев при сушке. Тем самым было показано, что листья и стебли нельзя рассматривать как единый объект сушки: их сорбционные свойства различаются, а значит, отличаются и условия достижения конечной влажности. Результаты, изложенные в этой статье, стали основой для последующих моделей массопереноса в процессе сушки.

Позднее D. M. Gao продолжил эту линию в исследованиях, уточнив модели десорбции для стеблей и листьев люцерны и оптимизировав параметры описания изотерм [25]. В логике процесса сушки это означает более точное задание равновесной влажности и, следовательно, более надежный расчет конечной стадии обезвоживания. Автор подтвердил влияние температуры на сдвиг изотерм и подчеркнул, что основная влага находится в стадии многослойной адсорбции, что и определяет падающую скорость сушки и необходимость контроля градиентов влажности и температуры.

Следующая группа научных работ посвящена кинетическим моделям тонкого слоя и сопряженному описанию влагосодержания и температуры в процессе сушки. Эмпирические и полуэм-

пирические модели тонкослойной сушки (модели Льюиса, Пейджа, Хендерсона–Пабиса и их модификации) описывают кинетику обезвоживания на основе экспериментальных кривых потери влаги и широко используются для прогнозирования времени сушки и влияния внешних факторов (температуры, скорости воздуха).

В фундаментальном исследовании J. A. Siles кинетику сушки стеблей, листьев и целого растения моделировали одновременно по влажности и температуре в фиксированном слое при конвективной сушке. Его модель учитывает взаимосвязь между температурой материала и скоростью удаления влаги, что позволяет более точно прогнозировать изменение качества корма в процессе сушки. Модель адекватно описывала 94,4 % экспериментальных данных по влажности для стеблей и 70,1 % для листьев в пределах доверительного интервала ± 15 % [8]. При этом для стеблей наблюдалось лучшее совпадение расчетных и экспериментальных кривых, что объясняется более однородной структурой их ткани по сравнению с листьями. Это важный результат, показывающий, что для моделирования сушки люцерны одной только аппроксимации кривой изменения влажности недостаточно, необходимо учитывать и тепловое состояние материала, иначе модель теряет физическую интерпретируемость.

Сходную по направлению, но более прикладную работу выполнил Н. Darvishi, который математически моделировал тонкослойную сушку люцерны [28]. Его модель позволила рассчитать эффективный коэффициент диффузии и энергозатраты, показав, что микроволновая

сушка ускоряет процесс, но требует тщательного контроля температуры во избежание перегрева термолабильных веществ.

М. Tasova исследовал кинетику сушки люцерны при температуре 50, 60 и 70 °С и на открытом воздухе, подбирая наиболее пригодные модели для описания кинетики обезвоживания тонкого слоя. Было показано, что сортовые различия и температура заметно влияют на длительность сушки и на точность аппроксимации [38]. Его анализ показал, что биологическая вариативность сортов люцерны влияет на профиль сушки: для разных сортов наилучшую сходимость с экспериментом демонстрировали разные модели, что, по его мнению, подчеркивает невозможность создания одной универсальной эмпирической модели сушки.

В более новой работе М. Kaplan сравнительно оценил разные способы сушки люцерны и установил, что ее кинетику лучше всего описывает экспоненциальная модель Jena–Das, а комбинированная сушка (конвективная + микроволновая) обеспечила наиболее благоприятное сочетание качества продукта и энергозатрат [4].

Для промышленной сушки особое значение имеют математические модели, ориентированные на конкретные типы сушильных установок. Х. Zheng использовал улучшенный метод размерностного анализа для моделирования сушки люцерны в барабанной сушилке и показал, что технологические параметры этого процесса могут быть сведены к обобщенным критериальным зависимостям [39]. Им были выведены безразмерные критерии, интегрирующие параметры

процесса, такие как влажность сырья, производительность, частота вращения барабана, температура и скорость нагретого воздуха. Было установлено, что температура сушки является доминирующим фактором, влияющим на скорость обезвоживания и качество продукта. Разработанные эмпирические уравнения с коэффициентами корреляции выше 0,99 позволяют прогнозировать взаимное влияние параметров на характеристики сушки.

Е. Arinze предложил математическую модель фракционной сушки и аэродинамического разделения листьев и стеблей в барабанной сушилке, которая математически описывает не только влагоперенос, но и фракционирование зеленой массы, что важно не только для моделирования кинетики процесса, но и для создания условий для сохранения питательной ценности корма [35]. Он установил, что скорость сушки листьев превышает скорость сушки стеблей более чем в три раза.

Т. Vartzanas применил CFD-подход к сушке зеленой массы люцерны в поле, показав пространственную неоднородность микроклимата и возможность использовать модель как инструмент принятия решений после скашивания [40]. Его двухмерная модель позволила визуализировать распределение влажности внутри валка с учетом солнечной радиации и скорости ветра.

Современный этап развития моделирования сушки люцерны представлен работой D. Friso, который адаптировал дифференциальные уравнения массо- и теплопереноса для создания алгоритмов регулирования параметров в реальном времени. Его модель основана на реше-

нии системы дифференциальных уравнений, описывающих тепло- и массообмен между продуктом и воздухом в двух зонах сушилки: зоне постоянной скорости сушки и зоне падающей скорости. В его работе для барабанной сушилки люцерны построена наиболее полная модель с экспериментальной верификацией, максимальная относительная ошибка которой составила всего 2,4 % [41].

В 2025 г. X. Gao предложил динамическую модель сушки тюков люцерны в подвижном слое солнечно-воздушным тепловым насосом на основе нейронных сетей с использованием модели Пейджа, позволившую точно прогнозировать влажность, время и энергопотребление процесса сушки [6].

В целом эволюция моделей сушки люцерны идет от простых эмпирических моделей к комплексным многомасштабным подходам, т. е. от описания «средней» кривой обезвоживания к многоуровневому расчету, учитывающему морфологическую неоднородность, равновесную влажность, тепловой режим, энергетику и управление процессом. Перспективными направлениями остаются интеграция ИИ (искусственного интеллекта), комбинированные системы с возобновляемыми источниками энергии для промышленных установок. Наиболее перспективными выглядят модели, сочетающие физическую интерпретируемость с возможностью оптимизации режимов сушки и сохранения качества листовой фракции. Для люцерны это принципиально, поскольку практическая задача состоит не только в достижении заданной влажности, но и в минимизации пересушивания листьев, механических потерь и деградации питательных веществ.

В последние годы выявляется тенденция к интеграции традиционных диффузионных моделей с методами искусственного интеллекта. Так, применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования кинетики сушки сельскохозяйственных культур показывает, что алгоритмы машинного обучения способны предсказывать влажность люцерны с меньшей среднеквадратичной ошибкой по сравнению с классическими эмпирическими уравнениями, так как они способны неявно учитывать сложную нелинейную связь между формами воды в тканях [42]. Кроме того, развитие CFD-моделирования позволяет получать трехмерную картину течения сушильного агента вокруг сложных геометрических форм измельченной люцерны, однако применение этих методов к данному конкретному виду сырья пока остается ограниченным из-за высокой вычислительной стоимости и недостатка данных о микроструктуре растительных тканей [43].

Несмотря на значительный прогресс в области моделирования процесса сушки люцерны, существующие подходы имеют ограничения. Большинство моделей не учитывают асинхронность сушки стеблей и листьев в достаточной мере и рассматривают зеленую массу люцерны как гомогенную среду или требуют раздельного ввода значений параметров для стеблей и листьев, что приводит к погрешностям при прогнозировании качества конечного продукта. До сих пор отсутствуют комплексные модели, способные в едином вычислительном пространстве симулировать асинхронный влагоперенос в стеблях и листьях с учетом деградации их структурных свойств

в процессе нагрева. Кроме того, модели энергопотребления часто не интегрированы с моделями качества корма, что затрудняет оптимизацию по нескольким критериям одновременно. Перспективным направлением исследований является разработка комплексных моделей, объединяющих кинетику влагопереноса, термодинамику процесса и биохимические изменения в тканях люцерны.

Заключение. Систематический анализ научной литературы позволил структурировать современные знания о механизмах обезвоживания зеленой массы люцерны. Процесс ее сушки представляет собой сложное явление тепло- и массообмена. Его протекание определяется неоднородным распределением влаги в тканях растения.

В тканях люцерны выделяют три формы воды: свободную, физико-химически связанную и химически связанную. Такое разделение объясняет, почему кинетика сушки зеленой массы имеет нелинейный характер. Кроме того, оно обосновывает резкое увеличение энергозатрат на финальных этапах сушки.

В процессе сушки люцерны по мере обезвоживания происходит смена физиологической стадии на биохимическую. При этом механизмы влагопереноса кардинально меняются. На начальном этапе доминирует поверхностное испарение и мембранный транспорт в живых тканях. На поздних стадиях — только диффузионное перемещение прочно связанной влаги через клеточные структуры.

Выявлено ключевое технологическое противоречие процесса сушки: стебли и листья люцерны обезвоживаются асинхронно. Тонкие листья с большой удель-

ной площадью поверхности теряют влагу более чем в три раза быстрее толстых стеблей. Последние защищены восковым кутикулярным слоем, который препятствует испарению. При традиционной сушке, к моменту, когда стебли достигают требуемой влажности, листья уже критически пересушены, из-за чего становятся хрупкими и разрушаются при транспортировке. Поскольку именно в листьях концентрируются каротиноиды и витамины, такая асинхронность снижает питательную ценность корма. Решение проблемы требует предварительного механического воздействия на стебли для выравнивания кинетических кривых сушки фракций, а также подбора адаптивных режимов сушки.

Анализ подходов к математическому моделированию сушки люцерны показывает эволюцию от простых эмпирических уравнений сушки тонкого слоя к сложным механистическим моделям сопряженного тепло- и массопереноса. Современные методы, такие как CFD-моделирование и искусственные нейронные сети, обеспечивают высокую точность прогнозирования для конкретных конструкций сушилок. Однако существует существенный пробел в иссле-

дованиях: большинство моделей рассматривает растительную массу как условно однородную среду. Отсутствуют алгоритмы, способные в едином пространстве моделировать асинхронный влагоперенос стеблей и листьев с одновременным учетом термодеструкции питательных веществ.

Обзор показал необходимость перехода к созданию интегрированных цифровых двойников процесса сушки люцерны. Перспективное развитие кормопроизводства требует многомасштабных моделей, объединяющих термо- и гидродинамику, кинетику асинхронного обезвоживания фракций люцерны, биохимическую деградацию питательных веществ и энергетический баланс оборудования. Сочетание физически обоснованных диффузионных моделей с алгоритмами машинного обучения открывает путь к системам интеллектуального управления сушильными аппаратами. Такие системы смогут в реальном времени оптимизировать параметры процесса, минимизировать потери питательных веществ листовой фракции и находить компромисс между энергоэффективностью и сохранением кормовой ценности люцерны.

Литература

1. Antoniv S., Kolisnyk S., Zapruta O. Люцерна: історія походження назви, агроекологічне значення, основа високобілкових кормів // Корми и кормовиробництво. – 2023. – Т. 96. – С. 208–214. – EDN DSMZYI. – DOI 10.31073/kormovyrobnytsvo202396-19.
2. Srisaikham S. A comparison of nutritional values, bioactive compounds, amino acids, and antioxidant activities of alfalfa (*Medicago sativa* L.) plant and pellet for use as beneficial material ruminant feed // Walailak Journal of Science and Technology (WJST). – 2021. – Vol. 18. – № 5. – EDN JSYPIG. – DOI 10.48048/wjst.2021.10312.
3. Sustainable biorefinery of alfalfa (*Medicago sativa* L.) / H. El-Ramady, N. Abdalla, S. Kovacs, et al. // Egyptian Journal of Botany. – 2020. – Vol. 60. – № 3. – Pp. 611–629. – DOI 10.21608/ejbo.2020.37749.1532.
4. Comparison of drying methods for biochemical composition, energy aspects, and color properties of alfalfa hay / M. Kaplan, N. Çetin, B. Çiftci, S. Karpuzcu // Biomass Conversion and Biorefinery. –

2025. – Vol. 15. – Pp. 10331–10346. – DOI 10.1007/s13399-024-05920-8.
5. Production of alfalfa hay under different drying methods / M. A. Neres, D. D. Castagnara, E. E. Mesquita, M. A. Zambom // *Revista Brasileira de Zootecnia*. – 2010. – Vol. 39. – № 8. – Pp. 1676–1683. – DOI 10.1590/S1516-35982010000800008.
 6. A dynamic drying process: Mathematical modeling and energy consumption optimization of alfalfa bales using hot air drying / X. Gao, Ch. Xuan, Zh. Tang, et al. // *Renewable Energy*. – 2025. – Vol. 246. – EDN JNAHQU. – DOI 10.1016/j.renene.2025.122961.
 7. Design and analysis of new solar-powered sustainable dryers: Alfalfa crop / M. Koşan, G. Karaca Dolgun, B. Aktekel, et al. // *Journal of Food Process Engineering*. – 2023. – Vol. 46. – № 3. – EDN JMCEOB. – DOI 10.1111/jfpe.14253.
 8. Kinetics of alfalfa drying: simultaneous modelling of moisture content and temperature / J. A. Siles, P. González-Tello, M. A. Martín, A. Martín // *Biosystems Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – Pp. 185–196. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2014.10.007.
 9. A Review of alfalfa drying technology and equipment throughout the whole process / W. Zhang, H. Cen, W. Guo, P. She // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – № 22. – EDN VIKRAW. – DOI 10.3390/app152212268.
 10. Du J., Sun Z., Chen Z. Design and experiment of drying equipment for alfalfa bales // *Agriculture*. – 2025. – Vol. 15. – № 19. – EDN HEMWXY. – DOI 10.3390/agriculture15192000.
 11. Hot air drying, impact of infrared drying, and combined hot air-infrared drying on alfalfa drying quality and performance / X. Sun, Z. Guo, G. Wang, et al. // *INMATEH-Agricultural Engineering*. – 2023. – Vol. 71. – № 3. – Pp. 441–450. – DOI 10.35633/inmateh-71-38.
 12. Du J., Liu Ch. Experimental study on drying characteristics of alfalfa hay bales using hot air convection // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – № 7. – EDN UZXVDX. – DOI 10.3390/app15073921.
 13. Effects of corn hardness and drying temperature on digestibility of energy and nutrients in diets fed to growing pigs / C. D. Espinosa, J. Cabañas-Ojeda, E. O. Oviedo-Rondón, H. H. Stein // *Journal of Animal Science*. – 2023. – Vol. 101. – EDN PUNZYN. – DOI 10.1093/jas/skad124.
 14. Alfalfa quality improvement and loss reduction technology advances / Si. Yi. Wang, G. L. Yang, Yu. Yu. Jing, et al. // *Frontiers in Animal Science*. – 2025. – Vol. 6. – EDN AAUAOI. – DOI 10.3389/fanim.2025.1550492.
 15. Characterization of forage quality, phenolic profiles, and antioxidant activity in alfalfa (*Medicago sativa* L.) / D. Horvat, M. Viljevac Vuletić, L. Andrić, et al. // *Plants*. – 2022. – Vol. 11. – № 20. – EDN QOPOTE. – DOI 10.3390/plants11202735.
 16. Dynamic drying characteristics of alfalfa under solar energy – heat pump combined drying conditions / W. B. Guo, Sh. Cheng, Z. K. Cui, et al. // *INMATEH-Agricultural Engineering*. – 2024. – Vol. 73. – № 2. – Pp. 569–580. – DOI 10.35633/inmateh-73-48.
 17. Энергетика и кинетика процессов дегидратации растительного сырья / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, А. К. Бурдо, и др. // *Проблемы региональной энергетики*. – 2022. – № 3 (55). – С. 111–129. – EDN MSHZJJ. – DOI 10.52254/1857-0070.2022.3-55.09.
 18. Ertekin C., Firat M. Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2017. – Vol. 57. – № 4. – Pp. 701–717. – DOI 10.1080/10408398.2014.910493.
 19. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models / A. K. Babu, G. Kumaresan, V. A. Aroul, R. Velraj // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 90. – Pp. 536–556. – DOI 10.1016/j.rser.2018.04.002.
 20. Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application / M. D. J. Peters, C. Marnie, H. Colquhoun, et al. // *Systematic Reviews*. – 2021. – Vol. 10. – № 1. – Pp. 1–6. – EDN LKIVHU. – DOI 10.1186/s13643-021-01821-3.
 21. Siddaway A. P., Wood A. M., Hedges L. V. How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses // *Annual Review of*

- Psychology. – 2019. – Vol. 70. – Pp. 747–770. – DOI 10.1146/annurev-psych-010418-102803.
22. Mattos S. M., Cestari V. R. F., Moreira T. M. M. Scoping protocol review: PRISMA-ScR guide refinement // *Revista de Enfermagem da UFPI*. – 2023. – Vol. 12. – № 1. – EDN KCSPWW. – DOI 10.26694/reufpi.v12i1.3062.
 23. Mengist W., Soromessa T., Legese G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research // *MethodsX*. – 2020. – Vol. 7. – EDN HGCMGR. – DOI 10.1016/j.mex.2019.100777.
 24. Mujumdar A. S. *Handbook of industrial drying*. 4th ed. – New York : CRC Press, 2015. – P. 1348 – EDN WULFVD. – DOI 10.1201/b17208.
 25. Gao D. M., Huang Z. G., Li J., Wang D. C. Water desorption isotherm models and parameters optimization of Alfalfa (*Medicago sativa* L) stems and leaves // *Acta Agrestia Sinica*. – 2017. – Vol. 25. – № 4. – Pp. 851–856. – DOI 10.11733/j.issn.1007-0435.2017.04.024.
 26. Arabhosseini A., Huisman W., Müller J. Modeling of desorption of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) stems and leaves // *Industrial Crops and Products*. – 2011. – Vol. 34. – Pp. 1550–1555. – DOI 10.1016/j.indcrop.2011.05.018.
 27. Yeşilata B., Aktacir M. A. A simple moisture transfer model for drying of sliced foods // *Applied Thermal Engineering*. – 2009. – Vol. 29. – № 4. – Pp. 748–759. – EDN MTNTWT. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.048.
 28. Darvishi H. Mathematical modeling, moisture diffusion and energy consumption in thin layer drying of alfalfa // *Middle-East Journal of Scientific Research*. – 2012. – Vol. 12. – № 4. – Pp. 511–516. – DOI 10.5829/idosi.mejsr.2012.12.4.1700.
 29. Drying procedures affect non-structural carbohydrates and other nutritive value attributes in forage samples / S. Pelletier, G. F. Tremblay, A. Bertrand, et al. // *Animal Feed Science and Technology*. – 2010. – Vol. 157. – № 3–4. – Pp. 139–150. – DOI 10.1016/j.anifeedsci.2010.02.010.
 30. Andueza D., Delgado I., Muñoz F. Effect of lucerne preservation method on the feed value of forage // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 2009. – Vol. 89. – № 12. – Pp. 1991–1996. – DOI 10.1002/jsfa.3676.
 31. Ghorbani Z., Hemmat A., Masoumi A. A. Physical and mechanical properties of alfalfa grind as affected by particle size and moisture content // *Journal of Agricultural Science and Technology*. – 2012. – Vol. 14. – № 1. – Pp. 65–76. URL https://www.researchgate.net/publication/265877094_Physical_and_Mechanical_Properties_of_Alfalfa_Grind_as_Affected_by_Particle_Size_and_Moisture_Content.
 32. Khan Md. I. H., Batuwatta-Gamage C. P., Karim M. A., Gu Y. Fundamental understanding of heat and mass transfer processes for physics-informed machine learning-based drying modelling // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – № 24. – EDN SQFVRM. – DOI 10.3390/en15249347.
 33. Effects of drying procedures on chemical composition and nutritive value of alfalfa forage / F. Jančík, P. Kubelková, V. Kubát, et al. // *South African Journal of Animal Science*. – 2017. – Vol. 47. – № 1. – Pp. 96–101. – DOI 10.4314/sajas.v47i1.14.
 34. Adapa P. K., Schoenau G. J., Arinze E. A. Fractionation of alfalfa into leaves and stems using a three pass rotary drum dryer // *Biosystems Engineering*. – 2005. – Vol. 91. – № 4. – Pp. 455–463. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2004.12.003.
 35. Aerodynamic separation and fractional drying of alfalfa leaves and stems — a review and new concept / E. A. Arinze, G. J. Schoenau, S. Sokhansanj, P. Adapa // *Drying Technology*. – 2003. – Vol. 21. – № 9. – Pp. 1669–1698. – DOI 10.1081/DRT-120025503.
 36. Iji S. I., Inyang U. E., Etuk B. R. Models for the development of sorption isotherms: A review // *American Journal of Food Science and Technology*. – 2025. – Vol. 13. – № 2 – Pp. 27–37. – EDN NIUNKL. – DOI 10.12691/ajfst-13-2-2.
 37. Mahmoud A., Arlabosse P., Fernandez A. Application of a thermally assisted mechanical dewatering process to biomass // *Biomass and Bioenergy*. – 2011. – Vol. 35. – № 1. – Pp. 288–297. –

EDN YCAINH. – DOI 10.1016/j.biombioe.2010.08.037.

38. Taşova M., Polatçı H., Özkurt M. Mathematical modelling of thin layer drying of alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties at different temperatures // Turkish Journal of Agriculture — Food Science and Technology. – 2020. – Vol. 8. – Special issue № 1. – Pp. 139–144. – DOI 10.24925/turjaf.v8isp1.139-144.4059.
39. Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method / X. Zheng , Y. Lan, J. Wang, H. Dong // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2009. – Vol. 2. – № 3. – Pp. 76–82. – DOI 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.076-082.
40. A numerical modelling approach for biomass field drying / T. Bartzanas, D. D. Bochtis, C. G. Sørensen, et al. // Biosystems Engineering. – 2010. – Vol. 106. – № 4. – Pp. 458–469. – EDN NXBYLR. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2010.05.010.
41. Friso D. Mathematical modelling of rotary drum dryers for alfalfa drying process control // Inventions. – 2023. – Vol. 8. – № 1. – EDN PURCFN. – DOI 10.3390/inventions8010011.
42. Onwude D. I., Hashim N., Chen G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops // Trends in Food Science & Technology. – 2016. – Vol. 57. – Pp. 132–145. – DOI 10.1016/j.tifs.2016.09.012.
43. Defraeye T. Advanced computational modelling for drying processes – A review // Applied Energy. – 2014. – Vol. 131. – Pp. 323–344. – EDN UUJAQT. – DOI 10.1016/j.apenergy.2014.06.027.

References

1. Antoniv S., Kolisnyk S., Zapruta O. *Lytserna: istoriya pokhodzhennya nazvi, agroekologichne znachennya, osnova visokobilkovikh kormiv* [Alfalfa: history of the name origin, agroecological importance, basis for high-protein feed]. Feeds and Feed Production. 2023. Vol. 96. Pp. 208-214. DOI 10.31073/kormovyrobnytsvo202396-19.
2. Srisaikhram S. A comparison of nutritional values, bioactive compounds, amino acids, and antioxidant activities of alfalfa (*Medicago sativa* L.) plant and pellet for use as beneficial material ruminant feed. Walailak Journal of Science and Technology (WJST). 2021. Vol. 18. No. 5. DOI 10.48048/wjst.2021.10312.
3. El-Ramady H., Abdalla N., Kovacs S., et al. Sustainable biorefinery and production of alfalfa (*Medicago sativa* L.). Egyptian Journal of Botany. 2020. Vol. 60. No. 3. Pp. 621-639. DOI 10.21608/ejbo.2020.37749.1532.
4. Kaplan M., Çetin N., Çiftçi B., Karpuzcu S. Comparison of drying methods for biochemical composition, energy aspects, and color properties of alfalfa hay. Biomass Conversion and Biorefinery. 2025. Vol. 15. Pp. 10331-10346. DOI 10.1007/s13399-024-05920-8.
5. Neres M.A., Castagnara D.D., Mesquita E.E., Zambom M.A. Production of alfalfa hay under different drying methods. Revista Brasileira de Zootecnia. 2010. Vol. 39. No. 8. Pp. 1676-1683. DOI 10.1590/S1516-35982010000800008.
6. Gao X., Xuan C., Tang Z., et al. A dynamic drying process: Mathematical modeling and energy consumption optimization of alfalfa bales using hot air dryin. Renewable Energy. 2025. Vol. 246. DOI 10.1016/j.renene.2025.122961.
7. Koşan M., Karaca Dolgun G., Aktekelî B., et al. Design and analysis of new solar-powered sustainable dryers: Alfalfa crop. Journal of Food Process Engineering. 2023. Vol. 46. No. 3. DOI 10.1111/jfpe.14253.
8. Siles J.A., González-Tello P., Martín M.A., Martín A. Kinetics of alfalfa drying: simultaneous modelling of moisture content and temperature. Biosystems Engineering. 2015. Vol. 129. Pp. 185-196. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2014.10.007.
9. Zhang W., Cen H., Guo W., She P. A Review of alfalfa drying technology and equipment throughout the whole process. Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 22. DOI 10.3390/app152212268.

10. Du J., Sun Z., Chen Z. Design and experiment of drying equipment for alfalfa bales. *Agriculture*. 2025. Vol. 15. DOI 10.3390/agriculture15192000.
11. Sun X., Guo Z., Wang G., et al. Hot air drying, impact of infrared drying, and combined hot air-infrared drying on alfalfa drying quality and performance. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 71. No. 3. Pp. 441-450. DOI 10.35633/inmateh-71-38.
12. Du J., Liu C. Experimental study on drying characteristics of alfalfa hay bales using hot air convection. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 7. DOI 10.3390/app15073921.
13. Espinosa C.D., Cabañas-Ojeda J., Oviedo-Rondón E.O., Stein H.H. Effects of corn hardness and drying temperature on digestibility of energy and nutrients in diets fed to growing pigs. *Journal of Animal Science*. 2023. Vol. 101. DOI 10.1093/jas/skad124.
14. Wang S.Y., Yang G.L., Jing Y.Y., et al. Alfalfa quality improvement and loss reduction technology advances. *Frontiers in Animal Science*. 2025. Vol. 6. DOI 10.3389/fanim.2025.1550492.
15. Horvat D., Viljevac Vuletić M., Andrić L., et al. Characterization of forage quality, phenolic profiles, and antioxidant activity in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plants*. 2022. Vol. 11. No. 20. DOI 10.3390/plants11202735.
16. Guo W.B., Cheng S., Cui Z.K., et al. Dynamic drying characteristics of alfalfa under solar energy-heat pump combined drying conditions. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2024. Vol. 73. No. 2. Pp. 569-580. DOI 10.35633/inmateh-73-48.
17. Burdo O.G., Terziev S.G., Burdo A.K., et al. *Ehnergetika i kinetika processov degidratacii rastitel'nogo syr'ja* [Energetics and kinetics of plant raw material dehydration processes]. *Regional Energetics Problems*. 2022. No. 3. Pp. 111-129. DOI 10.52254/1857-0070.2022.3-55.09.
18. Ertekin C., Firat M.Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017. Vol. 57. No. 4. Pp. 701-717. DOI 10.1080/10408398.2014.910493.
19. Babu A.K., Kumaresan G., Aroul V.A., Velraj R. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90. Pp. 536-556. DOI 10.1016/j.rser.2018.04.002.
20. Peters M.D.J., Marnie C., Colquhoun H., et al. Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application. *Systematic Reviews*. 2021. Vol. 10. Pp. 1–6. DOI 10.1186/s13643-021-01821-3.
21. Siddaway A.P., Wood A.M., Hedges L.V. How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. *Annual Review of Psychology*. 2019. Vol. 70. Pp. 747-770. DOI 10.1146/annurev-psych-010418-102803.
22. Mattos S.M., Cestari V.R.F., Moreira T.M.M. Scoping protocol review: PRISMA-ScR guide refinement. *Revista de Enfermagem da UFPI*. 2023. Vol. 12. No. 1. DOI 10.26694/reufpi.v12i1.3062.
23. Mengist W., Soromessa T., Legese G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*. 2020. Vol. 7. DOI 10.1016/j.mex.2019.100777.
24. Mujumdar A.S. *Handbook of industrial drying*, 4th ed. New York. CRC Press. 2015. Pp. 45–49. DOI 10.1201/b17208.
25. Gao D.M., Huang Z.G., Li J., Wang D.C. Water desorption isotherm models and parameters optimization of Alfalfa (*Medicago sativa* L) stems and leaves. *Acta Agrestia Sinica*. 2017. Vol. 25. No. 4. Pp. 851–856. DOI 10.11733/j.issn.1007-0435.2017.04.024.
26. Arabhosseini A., Huisman W., Müller J. Modeling of desorption of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) stems and leaves. *Industrial Crops and Products*. 2011. Vol. 34. Pp. 1550-1555. DOI 10.1016/j.indcrop.2011.05.018.
27. Yeşilata B., Aktacir M.A. A simple moisture transfer model for drying of sliced foods. *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29. No. 4. Pp. 748-759. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.048.

28. Darvishi H. Mathematical modeling, moisture diffusion and energy consumption in thin layer drying of alfalfa. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2012. Vol. 12. No. 4. Pp. 511-516. DOI 10.5829/idosi.mejsr.2012.12.4.1700.
29. Pelletier S., Tremblay G. F., Bertrand A., et al. Drying procedures affect non-structural carbohydrates and other nutritive value attributes in forage samples. *Animal Feed Science and Technology*. 2010. Vol. 157. No. 3-4. Pp. 139-150. DOI 10.1016/j.anifeedsci.2010.02.010.
30. Andueza D., Delgado I., Muñoz F. Effect of lucerne preservation method on the feed value of forage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2009. Vol. 89. No. 12. Pp. 1991-1996. DOI 10.1002/jsfa.3676.
31. Ghorbani Z., Hemmat A., Masoumi A.A. Physical and mechanical properties of alfalfa grind as affected by particle size and moisture content. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2012. Vol. 14. No. 1. Pp. 65–76. URL https://www.researchgate.net/publication/265877094_Physical_and_Mechanical_Properties_of_Alfalfa_Grind_as_Affected_by_Particle_Size_and_Moisture_Content.
32. Khan M.I.H., Batuwatta-Gamage C.P., Karim M.A., Gu Y. Fundamental understanding of heat and mass transfer processes for physics-informed machine learning-based drying modeling. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 23. DOI 10.3390/en15249347.
33. Jančík F., Kubelková P., Kubát V., Koukolová M., Homolka P. Effects of drying procedures on chemical composition and nutritive value of alfalfa forage. *South African Journal of Animal Science*. 2017. Vol. 47. No. 1. Pp. 96-101. DOI 10.4314/sajas.v47i1.14.
34. Adapa P. K., Schoenau G. J., Arinze E. A. Fractionation of alfalfa into leaves and stems using a three pass rotary drum dryer. *Biosystems Engineering*. 2005. Vol. 91. No. 4. Pp. 455-463. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2004.12.003.
35. Arinze E.A., Schoenau G.J., Sokhansanj S., Adapa P. Aerodynamic separation and fractional drying of alfalfa leaves and stems—a review and new concept. *Drying Technology*. 2003. Vol. 21. No. 9. Pp. 1669-1698. DOI 10.1081/DRT-120025503.
36. Iji S. I., Inyang U. E., Etuk B. R. Models for the development of sortpion isotherms: A review. *American Journal of Food Science and Technology*. 2025. Vol. 13. No. 2. Pp. 27–37. DOI 10.12691/ajfst-13-2-2.
37. Mahmoud A., Arlabosse P., Fernandez A. Application of a thermally assisted mechanical dewatering process to biomass. *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35. No. 1. Pp. 288-297. DOI 10.1016/j.biombioe.2010.08.037.
38. Taşova M., Polatçı H., Özkurt M. Mathematical modelling of thin layer drying of alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties at different temperatures. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*. 2020. Vol. 8. Special issue No. 1. Pp. 139-144. DOI 10.24925/turjaf.v8isp1.139-144.4059.
39. Zheng X., Lan Y., Wang J., Dong H. Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. Vol. 2. No. 3. Pp. 76-82. DOI 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.076-082.
40. Bartzanas T., Bochtis D.D., Sørensen C.G., et al. A numerical modelling approach for biomass field drying. *Biosystems Engineering*. 2010. Vol. 106. No. 4. Pp. 458-469. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2010.05.010.
41. Friso D. Mathematical modelling of rotary drum dryers for alfalfa drying process control. *Inventions*. 2023. Vol. 8. No. 1. DOI 10.3390/inventions8010011.
42. Onwude D.I., Hashim N., Chen G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology*. 2016. Vol. 57. Pp. 132–145. DOI 10.1016/j.tifs.2016.09.012.
43. Defraeye T. Advanced computational modelling for drying processes – A review. *Applied Energy*. 2014. Vol. 131. Pp. 323-344. DOI 10.1016/j.apenergy.2014.06.027.