

Semirnenko S.L. Harmful emissions from combustion of biomass

Currently, acute problems are associated with the exhaustion of traditional energy carriers and their high cost. As a way out of the current situation, it is proposed to switch to burning fuel biomass. At the same time, there are problematic issues related to the use of biomass as fuel. Emissions to the atmosphere, formed with complete and incomplete combustion of fuel in biomass-based plants, require study and analysis, which will contribute to the rational use of natural resources, the efficient use of energy, the reduction of carbon dioxide emissions and other harmful substances into the atmosphere.

Emissions into the atmosphere, which are formed during the combustion of biomass, can be divided into emissions at full and incomplete combustion of fuels at installations working on biomass.

Reducing the emissions of harmful substances is achieved either by preventing the formation of such substances (primary measures), or the removal of these substances from fuel gas (secondary measures).

Initial measures to reduce emissions are aimed at reducing the formation or reduction of emissions in a fuel cell. For this purpose, a number of measures are applied, including the following measures: change in the level of fuel humidity; change in the size of the fuel particles; the choice of the appropriate equipment for combustion of fuel; optimization of combustion control; step-by-step intake of air during combustion of fuel; step-by-step combustion and combustion of fuel. In practice, these activities are often interconnected.

Secondary measures to reduce emissions. Secondary measures may be used to remove the components of the flue gas emissions after it has left the boiler. Particular importance is the removal of particles during the burning of wet straw. Other types of biomass may require the use of additional secondary measures.

Key words: *combustion, harmful substances, fuel, reduction, emission level, biomass, combustion, measures.*

Дата надходження до редакції: 04.09.2017

Рецензент: д.т.н., проф. Павлюченко А.М.

УДК 620.9(083)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

М. Ю. Савченко-Перерва, к.т.н., доцент

С. М. Сабадаш, к.т.н., доцент

Л. Г. Рожкова, к.т.н., доцент

Сумський національний аграрний університет

Статья посвящена сравнительному анализу нетрадиционных источников энергии и выбору наиболее предпочтительного источника для автономного энергоснабжения различных устройств, в частности, сушилок сельскохозяйственной продукции, имеющих небольшую мощность. Альтернативные и возобновляемые источники энергии предпочтительны с точки зрения энергосбережения и экологической безопасности.

Ключевые слова: *альтернативные источники, ветроэнергетика, солнечная энергия, мощность, энергоносители.*

Постановка проблемы в общем виде. *На современном этапе развития возникли глобальные проблемы, от решения которых зависит будущее всего человечества. Одна из таких проблем - энерго- и ресурсосбережение, так как потребности в энергии возрастают многократно, стоимость энергоносителей увеличивается, запасы традиционных источников энергии иссякают. Добавляется и экологический кризис вследствие использования невозобновляемых ресурсов планеты. Изменения климата могут привести человечество к катастрофе. Решением данной проблемы является использование альтернативных и возобновляемых источников энергии. В энергобалансе некоторых из упомянутых государств доля возобновляемых источников энергии уже сейчас существенна, достигая 10-15 %, а в дальнейшем*

планируется достижение 30%-ной доли нетрадиционной энергетики в мировом энергобалансе.

Анализ последних исследований и публикаций. *К возобновляемым и нетрадиционным источникам энергии относятся, в частности, ветровая, солнечная, а также низко потенциальная теплота различных источников. Для данных видов энергии важно еще и то обстоятельство, что они могут быть автономными. Мировой опыт показывает, что оптимальное соотношение централизованных и децентрализованных электрогенерирующих мощностей в любой стране примерно равен 51:49 с небольшим преимуществом централизованной энергетики. В Украине соотношение централизованных и децентрализованных электрогенерирующих мощностей составляет 93:7, где только 7% децентрализовано, что обуславливает большие потери в энергетиче-*

ском комплексе [1]. Задачу децентрализации может решить применение автономных источников энергии, в частности ветроустановок и солнечных батарей. Однако при выборе источника энергии необходимо учитывать их преимущества

и недостатки. В табл. 1 приведен сравнительный анализ выборочных характеристик энергосистем на возобновляемых и ископаемых источниках энергии по данным [2].

Таблица 1.

Сравнение характеристик энергосистем на возобновляемых и ископаемых источниках энергии

Характеристики энергосистемы	На возобновляемых источниках энергии	На ископаемых источниках энергии
Примеры источника	Ветер, солнце, приливы	Уголь, нефть, газ
Местонахождение	Окружающая природная среда	Сосредоточенные месторождения
Естественная форма существования	Потоки энергии	Потенциальная, связанная энергия
Начальная интенсивность	Низкая интенсивность, рассеянная энергия с плотностью 300 Вт/м ² и меньше	Высокая интенсивность, до 100 кВт/м ³ и выше
Время истощения	Бесконечное	Конечное
Стоимость потребляемых энергоресурсов	Бесплатно	Непрерывно возрастает, (более 0.01 долл. США за 1 кВт·ч)
Ограничение для использования	Особенности местных условий и спроса на энергию	Без ограничений
Размеры	Небольшие системы экономичны, в больших возникают трудности	Крупные системы обычно предпочтительнее
Автономность	Само обеспеченными источниками энергии	Зависят от поставок топлива
Влияние на окружающую среду	Обычно, небольшое, особенно на небольших установках	Как правило, окружающая среда загрязняется, особенно воздух и вода

Как видно, не возобновляемые и возобновляемые источники энергии имеют как достоинства, так и недостатки. Однако вторые обладают, на наш взгляд, главными преимуществами: неиссякаемостью в обозримом будущем и относительной экологической безопасностью.

По нашему мнению, следует указать еще на одну статью расходов – транспортировка энергии потребителю. Установки, работающие с использованием возобновляемых источников энергии при определенных условиях (автономность, небольшие размеры) могут быть выигранными в данном плане. Приведенные выше данные доказывают перспективность использования возобновляемых источников энергии. Выбор вида источника зависит от конкретных условий. Так, получение энергии из биомассы предпочтительнее там, где развито в достаточной степени животноводство, в такой же степени это относится и к геотермальным источникам.

Наиболее перспективным среди возобновляемых источников энергии, на первый взгляд, является солнечная энергия при прямом ее преобразовании. По данным [2] теоретически достижимый коэффициент поглощения солнечного излучения, поступающего на приемник, может достигать значений 0.9÷0.95 за счет специальных (достаточно дорогостоящих) покрытий поверхностей коллекторов. Однако использование приемников с таким высоким коэффициентом поглощения приводит к существенному местному понижению температуры и, как следствие, к конденсации водяных паров, что уменьшает поступление солнечного излучения. Кроме того, существует проблема запыления энергопоглощающих поверхностей в процессе эксплуатации, что

также ведет к снижению суммарного КПД солнечной установки. С учетом данных факторов, интегральная величина КПД солнечной электростанции (СЭС) в общем случае находится в пределах от 12 % до 20 % [1, 2]. Зависимость солнечной энергии от атмосферных условий, а также изменение ее интенсивности в течение суток (до нулевого минимума ночью) обуславливает целесообразность ее непосредственного использования только в районах с соответствующими климатическими условиями. Это, безусловно, накладывает определенные ограничения на применение солнечных батарей.

Что касается ветроэнергетики, то известно, что она является одним из наиболее перспективных направлений альтернативной энергетики. Так, инвестиции в мировой ветроэнергетический сектор в 2014г. увеличились на 11%, достиг рекордных 99,5 млрд долларов США по данным Bloomberg New Energy Finance. При этом следует отметить, что ветроустановки могут использоваться не только в качестве электрогенерирующих устройств, но и для прямой генерации теплоты, используемой затем для отопления, получения горячей воды и так далее. Принципиальная схема системы отопления с использованием ветроустановки обычно включает следующие устройства: тепловой аккумулятор-генератор, в случае электронгрева теплоносителя - электрогенератор, электронгреватели, трубопроводную систему для теплоносителя с радиаторами нагревания. Существует также способ нагревания теплоносителя в тепловом аккумуляторе-генераторе с помощью перемешивания теплоносителя специальным ротором, присоединенным непосредственно к вращающемуся валу.

Другим бурно развивающимся видом использования альтернативных видов энергии является утилизация низкопотенциального тепла земли, воды, воздуха и других подобных источников. В процессе использования традиционных видов энергии (уголь, нефть, газ и т.д.) в атмосферу и воду сбрасывается значительное количество сопутствующей тепловой энергии. Это низкотемпературное рассеянное тепло, так называемый вторичный источник теплоты. Его запасы огромны, и существуют большие потенциальные возможности использования энергии, которая вокруг нас, в самых различных сферах деятельности человека. Кроме того, в качестве естественных возобновляемых источников может рассматриваться тепловая энергия земли и подземных вод (грунтовых, артезианских), а также наружного воздуха. Наиболее удачным путем реализации этого громадного потенциала является применение тепловых насосов - принципиально новое решение проблемы теплоснабжения [3].

Формулирование целей статьи (постановка задачи). Цель данной статьи – сравнительный анализ альтернативных источников энергии, в частности, энергии ветра и солнца, и выбор вида источника энергии для энергоэффективной сушки.

Изложение основного материала. Требуемая мощность тепловых устройств (ветроустановка, солнечных батарей, теплового насоса и т.д.), очевидно, будет обусловлена требуемым количеством тепла. Таким образом, в первую очередь необходимо определить мощность генератора тепла.

Что касается ветроустановки, то ее мощность обусловлена величиной доли кинетической энергии ветрового потока, извлекаемой из него ветроколесом ВУ, и определяется по формуле [2, 4]:

$$P = C_p \frac{\rho_a}{2} U_\infty^3 S,$$

где C_p – коэффициент использования энергии ветра; ρ_a – плотность воздуха; U_∞ – скорость ветра; S – площадь осевого сечения фигуры, ометаемой лопастями ВУ.

Коэффициент использования энергии ветра C_p является одним из основных критериев энергетической эффективности ВУ. В настоящее время для малых ветроустановок по данным [5] величина C_p не превышает 0,3. Однако для некоторых типов вертикально-осевых ветроустановок получен C_p более 0,3 [6].

Скорость ветра изменяется во времени, поэтому мощность ветроустановки рассчитывается по так называемой номинальной скорости. В настоящее время существуют различные способы определения номинальной скорости. От величины номинальной скорости будут зависеть размеры ветроколеса и, следовательно, стоимость ветроустановки. Таким образом, при опре-

делении номинальной скорости необходимо решать задачу оптимизации согласования величины выработки энергии и стоимости ветроустановки. Для этого необходимы данные по ветровой обстановке в месте размещения ветроустановки. Точность выбора номинальной скорости может существенно понизить стоимость ветроустановки. С другой стороны, реальная установочная мощность ветроустановки может быть меньше 10 кВт, так как необходимое суммарное количество вырабатываемой энергии зависит от диапазона изменения скорости ветра и ее повторяемости. При наличии аккумулирующих устройств суммарное количество вырабатываемой энергии может быть равномерно распределено во времени. Таким образом, точная оценка динамики скорости ветра во времени и расчет мощности ветроустановки на базе такой оценки может существенно уменьшить затраты на нее.

Солнечную энергию можно использовать не только для подогрева воды. Энергию солнца можно использовать для обогрева зданий, для получения питьевой воды из соленой, для подогрева воздуха для просушивания сельскохозяйственных культур и т.д. Тепловые двигатели, эффективность которых возрастает с повышением рабочей температуры, очевидно, также могут использовать солнечное тепло. Высокие температуры можно получить при концентрации потока солнечного излучения на малой площади. Эти приложения имеют важное значение для экономики. Например, на обогрев зданий зимой в странах с холодным климатом расходуется до половины энергетических ресурсов. Частичная разгрузка энергетики, связанная с проектированием или перестройкой зданий для использования солнечного тепла, позволит сэкономить миллионы долларов, которые затрачиваются на топливо за год. Что касается сельскохозяйственных культур, то значительная часть урожая в мире теряется вследствие поражения плесневым грибом, которое можно предупредить правильным просушиванием. Просушивание сельскохозяйственных культур требует переноса не только тепла, но и водяного пара.

Солнечные нагреватели воздуха аналогичны нагревателям воды, в которых жидкость нагревается, контактируя с поглощающей излучение поверхностью. В частности, влияние ориентации приемной площадки и потери тепла при обдувании ветром и т. д. для обоих типов нагревателей очень сходны.

Энергия, передаваемая воздуху от поглощающей поверхности в единицу времени, определяется по формуле:

$$P_u = \rho c Q (T_2 - T_1).$$

Плотность воздуха составляет 0,001 плотности воды, поэтому при одном и том же энергопотреблении объемный расход Q воздуха может быть гораздо выше. Однако, поскольку тепло-

проводность воздуха намного ниже, чем воды, для сходных условий передача энергии от приемной поверхности к теплоносителю происходит намного слабее. Поэтому нагреватели такого типа, чаще всего изготавливают с шероховатыми приемными поверхностями или с поверхностями, на которых нарезаны канавки для увеличения площади и усиления турбулентности, необходимой для теплопередачи в воздухе. Альтернативный вариант состоит в увеличении контактной поверхности при использовании пористых или сетчатых приемников. Анализ теплопереноса довольно сложен, поскольку трудно разделить полезное тепло и потери, так как потоки тепла внутри приемной пластины и от пластины к стеклянному покрытию связаны между собой. Это отражено на диаграмме рис. 1. Обычно в первом приближении этой связью пренебрегают для теплового потока, как и при анализе нагревателей воды.



Рис. 1. Психрометрическая диаграмма

Следует отметить, что нагреватели воздуха дешевле водяных, так как в них не требуется заливать тяжелую жидкость, их можно изготовить из светлых местных материалов и нет необходимости защищать от мороза.

Однако солнечная энергия также нестабильна во времени, как и ветровая. Это следует учитывать при ее использовании. Таким образом, и ветровая и солнечная энергия может быть автономным источником для различных устройств, в частности, для сушилок сельскохозяйственной продукции.

Как уже было сказано, большинство сельскохозяйственных культур перед закладкой на хранение необходимо просушить, иначе насекомые и плесневые грибки, которые быстро размножаются в условиях повышенной влажности, сделают их непригодными к употреблению. Это касается, например, пшеницы, риса, кофе, копры (мякоти кокосового ореха), плодов и овощей, других продуктов. Рассмотрим процесс сушки в сушилках. В них происходит перенос влаги от сельскохозяйственной культуры к окружающему воздуху, поэтому необходимо прежде всего определить, какое количество влаги может содержаться в воздухе в виде водяного пара.

Абсолютной влажностью, или «концен-

трацией водяного пара», x называется содержание водяного пара в 1 м^3 воздуха. При заданной температуре T , если пытаться повысить влажность x выше точки насыщения (например, прокачкой), жидкость начнет конденсироваться. Влажность насыщения x_s сильно зависит от температуры. Зависимость x_s (или какой-либо другой меры влажности) от T называется *психрометрической диаграммой* (рис.1). Отношение x/x_s , называется относительной влажностью и меняется от 0 (абсолютно сухой воздух) до 100% (насыщенный парами воды воздух).

Содержание влаги в сельскохозяйственных культурах также является важной характеристикой для процесса сушки. Процентное содержание влаги w в пробе продукта определяется согласно формуле:

$$w = (m - m_0) / m_0$$

где m — полная масса пробы; m_0 — масса сухого вещества (для древесины m_0 можно определить после просушивания пробы в печи при температуре 105°C в течение 24 ч). Будем использовать это определение содержания влаги в веществе (по «сухой массе»). В других случаях может быть использовано определение содержания влаги по «сырой массе»:

$$w' = (m - m_0) / m = w / (w + 1).$$

Определение m_0 следует проводить в лабораторных условиях в соответствии со стандартными процедурами для каждой культуры или продукта. Температура и время просушивания ограничены, в частности для зерна — пересушенное зерно может потрескаться, что также приведет к его порче.

Во время просушивания продукт будет отдавать влагу окружающему воздуху до тех пор, пока не будет достигнуто равновесное содержание влаги, значение которого для данного продукта зависит от температуры и влажности окружающего воздуха. Например, для риса при температуре воздуха 30°C и относительной влажности 80% $w_e \approx 0,16$.

Процесс просушивания происходит неравномерно. Большая часть влаги содержится в сельскохозяйственных продуктах в виде жидкости, попавшей в поры, которая быстро теряется после уборки урожая. Оставшаяся часть воды, обычно 30—40%, связана с продуктом химически, и поэтому удалить ее труднее. Важно, что сельскохозяйственные продукты (зерновые культуры, ягоды, фрукты и т.д.) необходимо просушить достаточно быстро, в течение нескольких дней после уборки урожая, так как в сырой продукции быстро разрастается плесень.

Энергетический баланс и температура характеризуют процесс просушки. Если не насыщенный парами воды воздух пропускать

сквозь влажный материал, воздух будет уносить с собой испаряемую влагу. Тепло, необходимое для испарения, содержится в воздухе и в просушиваемом материале. В процессе испарения воздух будет охлаждаться. В частности, если в процессе выпаривания массы m_w воды объем V воздуха охлаждается от T_1 до T_2 , то

$$m_w \Lambda = \rho c V (T_1 - T_2),$$

где Λ – удельная теплота парообразования воды; ρ и c – плотность и теплоемкость воздуха при постоянном давлении и средней температуре для умеренных разностей температур.

Основная проблема при конструировании сушилок, следовательно, заключается в определении T_1 и V , необходимых для удаления данного количества жидкости m_w . Температура T_1 не должна быть слишком высока, чтобы продукция не пересыхала. С другой стороны, мощность источника тепловой энергии должна быть рассчитана по потребной теплоте парообразования

воды, содержащейся в продукте.

Выводы.

1. Решением проблемы энерго- и ресурсосбережения является использование альтернативных и возобновляемых источников энергии, а также максимальное использование произведенной сбрасываемой тепловой энергии.

2. В качестве естественных возобновляемых источников может рассматриваться солнечная, ветровая, низкопотенциальная тепловая энергия земли и подземных вод (грунтовых, артезианских), а также наружного воздуха, биогаз.

3. В качестве источников энергии для переработки сельскохозяйственной продукции, частности, при сушке предпочтительна энергия солнца и ветра.

4. Мощность тепловых устройств для сушики, очевидно, будет обусловлена требуемым количеством тепла.

5. Выбор тепловых устройств зависит от многих факторов и, в первую очередь, от их эффективности и стоимости

Список использованной литературы:

1. Оніпко О.В. Вітроенергетика та енергетична стратегія / О.В. Оніпко. – К: Фенікс, 2008. – 163с.
2. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, Уэйр А. // Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
3. Тепловой насос как основа системы отопления [Электронный ресурс] // ООО "БИНОМ" (МОСКВА). – 2016. - № 3(135). – Режим доступа к журналу: holodilshchik.ru.
4. Ветроэнергетика / Под. ред. Д. де Рензо: Пер. с англ. // Под ред. Шефтера –М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
5. Дзендзерский В.А. Ветроустановки малой мощности / С. Тарасов, И. Костюков. – К: «Наукова думка», 2011. – 591с.
7. Рожкова Л.Г. Новые формы профилей лопастей вертикально – осевых ветроустановок средней быстроходности: Диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук: 05.14.07.- Су-мы, 2005. – 196с.

Savchenko-Pererva M.Yu., Sabadash S.M., Rozhkova L.G. Сравнительная характеристика альтернативных и возобновляемых источников энергии

Статья посвящена сравнительному анализу нетрадиционных источников энергии и выбору наиболее предпочтительного источника для автономного энергоснабжения различных устройств, в частности, сушилок сельскохозяйственной продукции, имеющих небольшую мощность. Альтернативные и возобновляемые источники энергии предпочтительны с точки зрения энергосбережения и экологической безопасности.

Ключевые слова: *альтернативные источники, ветроэнергетика, солнечная энергия, мощность, энергоносители.*

Savchenko-Pererva M.Yu., Sabadash S.M., Rozhkova L.G. Comparative characteristics of alternative and renewable energy sources

The article is devoted to a comparative analysis of non-traditional energy sources and the choice of the most preferable source for autonomous power supply of various devices, in particular, dryers of agricultural products having low power. Alternative and renewable energy sources are preferable from the point of view of energy saving and environmental safety.

The solution to the problem of energy and resource saving is the use of alternative and renewable energy sources, as well as the maximum use of the produced heat energy. As natural renewable sources, solar, wind, low-potential thermal energy of the earth and underground waters (ground, artesian), and also external air, biogas can be considered. As energy sources for processing agricultural products, in particular, during drying, the energy of the sun and wind is preferable.

The power of heat devices for drying will obviously be due to the required amount of heat. The choice of heat devices depends on many factors and, first of all, on their efficiency and cost. Another rapidly developing type of use of alternative types of energy is the utilization of low-potential heat of the earth, water, air and other similar sources. In the process of using traditional types of energy (coal, oil, gas, etc.) a significant amount of accompanying thermal energy is discharged into the atmosphere and water. This is low-temperature scattered heat, the so-called secondary source of heat.

Keywords: alternative sources, wind energy, solar energy, power, energy.

Дата надходження до редакції: 11.09.2017

Рецензент: д.т.н., проф. Саарела Йоко

УДК 664.8.047

ВЗАЄМНИЙ ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА АКУСТИЧНОГО НАГРІВАННЯ БІОЛОГІЧНИХ ПРОДУКТІВ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ СУШІННЯ

В. Ф. Яковлев, професор

О. Ю. Савойський, ст. викладач

Сумський національний аграрний університет

Теоретично обґрунтовано взаємний вплив електричного та акустичного нагрівання біологічного продукту на швидкість процесу при інфрачервоній конвективній сушці, для інтенсифікації процесу зневоднення продукту, з метою подальшого використання в практиці проектування і технічній реалізації методу.

Ключові слова: комбінована сушка, електричний нагрів, акустичне нагрівання, енергозатрати, інтенсивність, частота, коефіцієнт зменшення вологості, коефіцієнти впливу, коливальний процес.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Як було відмічено раніше, одним із важливих питань в технологічному процесі переробки сільськогосподарської продукції є впровадження нових високоефективних методів обробки, устаткування і технологій з оптимальним технічним рішенням. Аналіз показує, що існуючі методи сушки досить дорого коштують, енергоємні і іноді малоефективні [1]. Тому наукові дослідження, які направлені на вирішення задачі інтенсифікації процесу сушіння і водночас зниження витрат енергоносіїв є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні в літературі описана велика кількість методів інтенсифікації процесу сушки, в тому числі з використанням електрофізичних впливів на висушуваний продукт. Відомі методи акустичної сушки високої інтенсивності та електроконтактного нагріву плодоовочевої сировини струмом підвищеної частоти 5-25 кГц [2, 6]. Однак, у більшості випадків відомим методам характерні використання підвищених полів температур та значні енергозатрати, крім цього, їм притаманні недоліки, які суттєво знижують якість кінцевого продукту: змінюється колір, смак і його природній аромат, знижується його відновлюваність при замочуванні. Також більшість розроблених методів сушки пов'язані з особливостями конкретного виду та сорту овочів та фруктів, що не дозволяє уніфікувати підхід до питань розробки вказаних методів зневоднення та технічних систем на їх основі. Викладене вище дозволяє сформулювати основні задачі та принципи розробки нових методів сушіння та можливість їх комбінації для зме-

нення енергозатрат в процесі обробки сировини.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Теоретичне обґрунтування взаємного впливу електричного та акустичного нагрівання біологічного продукту на швидкість процесу його сушіння для подальшого використання в практиці проектування і технічній реалізації методу.

Основні матеріали досліджень. Метою сушіння продукту є зниження його вологості до рекомендованого стандартом значення, що забезпечує його тривале збереження та відповідні якісні показники. В процесі нагрівання продукту проходить випаровування вологи $W_{пе}$, що містить в собі продукт на початковій стадії сушіння тільки електричним методом, а $W_{па}$ - при сушінні тільки акустичним методом. Якщо передбачити застосування тільки одного з видів нагріву, наприклад, електричного, то зниження вологості пропорційно початковій $W_{пе}$, при цьому швидкість випаровування може бути визначено, як:

$$\frac{dw_e}{dt} = -k_e W_{пе} \quad (1)$$

де k_e - коефіцієнт зменшення вологості, який залежить від температури навколишнього середовища та інтенсивності нагрівання; причому $k_e > 0$.

При застосуванні тільки акустичного нагрівання та з урахуванням того, що зниження вологості пропорційно початковій $W_{па}$, швидкість випаровування може бути визначено, як:

$$\frac{dw_a}{dt} = -k_a W_{па} \quad (2)$$

де k_a - коефіцієнт зменшення вологості,