

УДК 66.047

К.Я. Охрименко, к.т.н., почесн. проф. ЧДТУ
В.А. Корецкий

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ АКУСТИЧЕСКОЙ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ И ПОРИСТЫХ СРЕД

Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, k_victor@ukr.net

С целью развития методов моделирования в работе сформулированы основные направления исследований в области акустической сушки капиллярно-пористых материалов на основе теории механики гетерогенных сред. Проведена оценка влияния температуры материала на силу вязкого трения Стокса в насыщенной пористой среде, влияния интенсивности звукового поля на кинетику акустической сушки и графически представлена зависимость давления акустической волны от интенсивности звука.

Ключевые слова: акустическая сушка, кинетика сушки, насыщенная пористая среда, математическое моделирование, механика гетерогенных сред, излучатели звука.

Вступление

С процессом операции сушки материалов можно встретиться во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства. Вместе с тем наблюдается некоторое отставание конструктивных решений сушильных установок, не учитывающих современных требований повышения экономической эффективности, производительности, экологической чистоты процесса сушки и получения высокого качества конечного продукта. Недостатки традиционных сушильных технологий, моральное несовершенство используемых установок понижают рентабельность процесса сушки и качество конечного продукта. Поэтому развитие современных методов математического моделирования для реализации альтернативных технологий сушки, разработки и внедрения новых сушильных устройств и установок может существенно повлиять на совершенствование этих процессов. Помимо традиционных видов сушки материалов (термическая, конвективная) представляет интерес альтернативный акустический способ, который имеет ряд преимуществ:

— более высокую экономическую эффективность по сравнению с традиционными методами;

— короткое время сушки и как следствие – высокую производительность установок;

— сушка может проходить с минимальным нагревом материала («холодная сушка»), которая позволяет сушить продукт, не подвергая его термическому воздействию и существенно снизить брак продукции на выходе.

Суть процесса акустической сушки состоит в интенсификации удаления влаги из материала путём помещения его под действие акустического поля высокой интенсивности (150-180 Дб). Вместе с тем внедрению данной технологии препятствует ряд проблем. Одна из таких проблем – недостаточное развитие математического аппарата для расчёта кинетики процесса акустической сушки капиллярно-пористых материалов. Поэтому в статье рассмотрены существующие подходы и анализ решения данной задачи.

Анализ последних исследований и публикаций.

Несмотря на то, что акустические колебания влияют на скорость удаления влаги из материала, процесс акустической сушки не получил серьёзного развития и на современном этапе находится на уровне лабораторных исследований. При этом, некоторые вопросы данной проблемы частично рассматривались в работах Института теоретической и прикладной механики (Новосибирск, Россия). Об этом свидетельствует ряд публикаций и патентов по акустической сушке [1,2,8]. Анализ более ранних публикаций и исследований [2] свидетельствует об основной направленности работ, связанных с построением некоторых гипотез описания физики процесса и результатов экспериментальных исследований. При этом практически не были сформулированы представления единого подхода к целостному описанию данного процесса и методов его расчёта. Развитие математической модели акустической сушки получило в работе [1], в которой процесс акустической сушки описывается уравнениями механики гетерогенных сред и уравнениями фильтрации; решена задача о динамике удаления влаги из брусьев прямоугольной формы. Изучается двухфазная система древесина-вода и в

рамках гетерогенной модели, которая представлена системой из пяти уравнений в частных производных, проводится численное решение. Для фильтрационной модели используется закон Дарси, отслеживаются параметры материала и звукового поля, которые влияют на динамику акустической сушки. В качестве недостатка исследования во-первых можно отметить, что расчёт ведётся только для тел правильной геометрической формы без учёта реально существующих возможных форм сыпучих материалов. Во-вторых, в работе при акустической сушке не учтены тепловой и конвективный фактор, а также не представлены теоретические зависимости динамики сушки от интенсивности звука и его частоты.

Постановка задачи

Известный процесс акустической обработки материалов требует описания единого подхода с общих позиций, поэтому для построения математической модели описания данного процесса остаётся актуальной задачей. С этой целью в работе рассматриваются вопросы связанные с:

1. Постановкой математической модели для описания распространения акустических волн в двухфазной системе каркас-вода.
2. Оценкой влияния температуры материала на силу Стокса.
3. Оценкой влияния интенсивности звукового поля на давление системы каркас-вода.
4. Постановкой математической модели для расчёта системы каркас-газ-вода.
5. Определением наиболее важных направлений для дальнейших исследований в сфере акустической сушки.

Решение поставленной задачи

1. Математическая модель процесса акустической сушки в первом периоде

Для описания процесса распространения акустической волны в капиллярно-пористом теле, насыщенном жидкостью, воспользуемся системой гиперболических уравнений механики гетерогенных сред в частных производных (1), которая дополнена уравнениями состояния (2). Индекс $i=1$ соответствует жидкости, $i=2$ – твёрдой фазе [1].

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i u_i}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1^2}{\partial x} = -m_1 \frac{\partial P_1}{\partial x} + F_S, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2^2}{\partial x} = -m_2 \frac{\partial P_2}{\partial x} - (P_2 - P_1) \frac{\partial m_2}{\partial x} - F_S, \quad \frac{\partial m_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial m_2}{\partial x} = R.$$

$$P_i = a_i^2 (\rho_{ii} - \rho_{ii,0}), \quad m_1 = 1 - m_2. \quad (2)$$

В (1), (2) $\rho_i = m_i \rho_{ii}$ – средняя плотность i -го компонента смеси; u_i – скорость i -го компонента смеси; P_i – давление i -го компонента смеси, m_i – объёмная концентрация i -го компонента смеси; $F_S = m_1 \rho_2 (u_2 - u_1) / \tau_S$ – сила Стокса; $\tau_S = 2 \rho_{22} r^2 / (9 \mu_1)$ – время стоксовой релаксации скоростей. Сила Стокса в работе [4] представлена несколько в другом виде: $F_S = \mu_1 m_1 n a K_\mu (u_2 - u_1)$. $R = m_1 m_2 (P_2 - P_1) / \mu_2$ – функция, описывающая процесс переноса твёрдой фазы; μ_i – динамическая вязкость i -го компонента смеси; ρ_{ii} – истинная плотность i -го компонента смеси; a_i – скорость звука материала i -го компонента смеси; $\rho_{ii,0}$ – истинная плотность материала i -го компонента смеси; x – пространственная переменная; a – характерный размер включений (в данном случае может быть выражен радиусом капилляров); n – единичная нормаль к межфазной поверхности; t – время.

Согласно [3] деформации твёрдого скелета, а также относительное смещение частиц скелета вызывают силу, приложенную по нормали к площадке контакта, которая стремится вытеснить жидкость. Это положение может быть принято в качестве физического обоснования процесса акустической сушки.

Согласно второго уравнения системы (1) следует, что выделению влаги из скелета препятствует сила Стокса, которая, прежде всего, характеризуется вязкими свойствами жидкости и препятствует вытеснению её из материала.

2. Влияние температуры на кинетику акустической сушки.

Согласно [4] сила Стокса равна $F_\mu = \mu_1 m_1 n a K_\mu (u_2 - u_1)$, где коэффициент μ_1 (коэффициент динамической вязкости жидкости) зависит от температуры материала. Отсюда следует, что и скорость акустической сушки зависит от температуры материала, что подтверждается экспериментами. Для определения μ_1 можно использовать формулу Френкеля-Андрэде:

$$\mu = Ae^{\frac{W}{kT}}, \quad (3)$$

где A – коэффициент, зависящий от дальности скачка молекулы, частоты её колебаний и температуры, W – энергия активации.

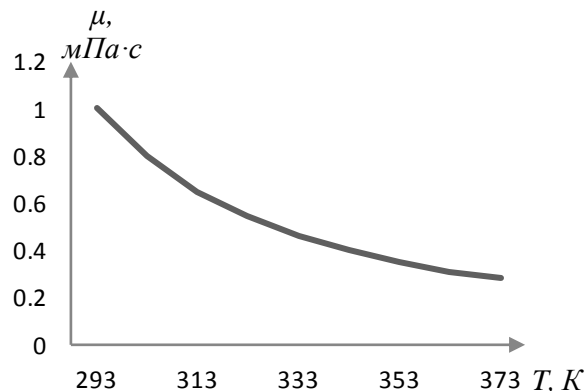


Рис.1 – Зависимость коэффициента динамической вязкости μ от температуры T .

Варьируя значением температуры в определённом интервале, появляется возможность построение графической зависимости, представленной на Рис.1. Формула (3) определяет экспоненциальную зависимость коэффициента динамической вязкости, а, следовательно, и силу трения Стокса от температуры материала, представленной графиком (Рис.1), который построен по табличным данным работы [5].

3. Влияние интенсивности звукового поля на кинетику акустической сушки.

Другим определяющим фактором динамики акустической сушки является интенсивность звукового поля. Интенсивность звукового поля зависит от излучателя звука и объёма сушильной камеры. В работе [1] опыты по удалению влаги с бруса проводили при интенсивности звука 177-178 Дб. На опытно-промышленной установке ООО «Акустика ресурс» интенсивность звука достигала 155-156 Дб. С ростом интенсивности звука и мощности звукового генератора увеличивается потребление энергии, однако при этом растёт скорость сушильного процесса. Об этом свидетельствуют экспериментальные исследования, представленные в [7], а также может быть обосновано с помощью простого расчёта.

При численном расчёте согласно математической модели (1), (2) в качестве граничных условий принимается значение максимальной амплитуды давления звуковой волны, которое оценивается по интенсивности звукового поля. Зависимость амплитуды давления в звуковой волне от интенсивности звукового поля определяется соотношением:

$$L = 20 \lg \frac{P_1}{P_0}, \quad (4)$$

где: P_1 – максимальная амплитуда давления, L – интенсивность звука, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$

Выразив из формулы (4) P_1 , оценим максимальную амплитуду давления для интенсивностей от 156 до 178 Дб. Результаты расчёта представлены графиком на рис.2. Подобная формула также была использована в работе [1].

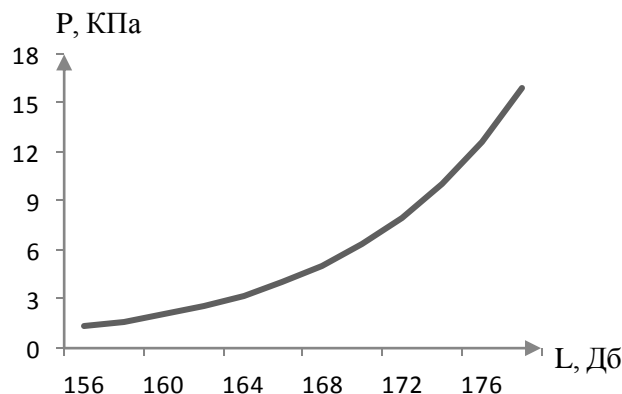


Рис. 2 – Зависимость максимальной амплитуды давления P от интенсивности звуковой волны L .

Одновременно с повышением звукового давления по закону Гука возрастают деформации тела, которые в свою очередь вызывают более интенсивное вытеснение воды из пористого скелета, чем объясняется рост скорости акустической сушки с повышением интенсивности звука в камере. Графические зависимости, представленные на рис.1,2 позволяют оптимизировать выбор параметров температурного режима и интенсивности звука.

4. Математическая модель процесса акустической сушки во втором периоде

В отличие от первого периода сушки во втором периоде скорость процесса замедляется из-за изменения объёмных концентраций компонентов. При этом пространство от удалённой воды в порах скелета занимает газ, который увеличивает свою объёмную концентрацию. В результате образуется трёхфазная система скелет-вода-газ. Методика расчёта, приведенная в работе [1] характерна для первого периода сушки и не учитывает газовой фазы. Результат исследования в [1], представленного графическими зависимостями видно, что по истечении времени экспериментальная кривая кинетики сушки приобретает более пологий характер, против теоретической. Это говорит о том, что пренебрегать наличием газа в капиллярах материала при расчёте кинетики сушки на длительном периоде нельзя. При помощи математической модели (5) можно рассчитать кинетику сушки во втором периоде. В этом случае объёмные концентрации компонентов будут изменяться по времени, поэтому с некоторым шагом во времени расчёт следует производить заново, так как соотношение фаз в системе скелет-газ-вода меняется. Математическая модель для расчёта волновых процессов в пористом теле, заполненном жидкостью с пузырьками газа представлена в работе [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{11}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{11} u_1}{\partial x} &= 0, \quad \frac{\partial \rho_{12}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{12} u_1}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial x} = 0, \\ \frac{d_1 u_1}{\partial t} &= -m_1 \frac{\partial P_1}{\partial x} + F_s, \quad \rho_2 \frac{d_2 u_2}{\partial t} = -m_2 \frac{\partial P_1}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_2^*}{\partial x} + F_s, \\ \frac{n}{n_0} &= \frac{\rho_1}{\rho_{10}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\rho_{11}, \rho_{12}, \rho_2$ – приведённые плотности жидкости, газа и скелета пористой среды соответственно, $\rho_1 = \rho_{11} + \rho_{12}$ – приведённая плотность газожидкостной смеси, σ_2^* – приведённое напряжение твёрдой фазы.

5. Проблемные вопросы расчёта процессов акустической сушки

В [8] впервые был предложен способ акустической сушки, при котором сушку ведут с чередующимися интервалами акустического воздействия и паузами между ними, при этом величина паузы определяется по следующей формуле:

$$\Delta \tau = \frac{\Delta U_\tau(x)^2}{a \Delta U_x}, \quad (6)$$

где a – коэффициент диффузии; $\Delta U_\tau(x)$ – изменение влажности на поверхности материала за время паузы; ΔU_x – разность влажности по длине поры осушаемого материала на интервале.

Для более удачного применения данной технологии необходима математическая модель и метод, с помощью которого можно было теоретически рассчитать параметры ΔU_τ и ΔU_x , имея в качестве исходных данных пористость, проницаемость, влагосодержание, геометрические размеры материала и другие параметры, значения которых известны или их можно определить путём несложного эксперимента. Более точное определение длительности и количества пауз во время процесса сушки может способствовать более рациональному расходу энергии, а, следовательно, повысить эффективность процесса акустической сушки.

Дальнейшие исследования процессов акустической сушки должны быть направлены не только на расчёт самого процесса, а и на усовершенствование соответствующих устройств и аппаратной базы. Большое внимание следует уделить разработке и расчётам аэродинамических источников звука, которые используются в качестве генераторов звукового поля. Технология акустической сушки ставит к излучателям звука ряд требований:

- высокая интенсивность излучаемого звука,
- экономичность и высокий КПД,
- высокая мощность,

- надёжность и простота в эксплуатации,
- высокий ресурс

Развитие источников звука и их соответствие перечисленным требованиям во многом зависят от разработки методов их расчёта и их применения во время проектирования и конструирования данных устройств.

6. Численные методы исследования движения насыщенных пористых сред

Разумеется, что задачи о расчёте процессов акустической сушки имеют практическую направленность. Главная цель решения этих задач – оптимизация процесса сушки, снижение энергетических затрат, разработка новых конструкций акустических сушилок и их аппаратного обеспечения и т.д. Поэтому для таких инженерных задач характерна необходимость доведения их до конкретных чисел, графиков, таблиц, на основании которых можно будет принимать решения.

В работе [1], а также в ряде других работ этих же авторов для расчёта процесса распространения волн используется *метод крупных частиц*. Метод крупных частиц является развитием *метода частиц в ячейках Харлоу*. Данные методики сочетают в себе преимущества лагранжева и эйлерова подходов. Область решения разбивается фиксированной в пространстве сеткой (эйлеровой сеткой); однако сплошная среда трактуется дискретной моделью – совокупностью частиц фиксированной массы (лагранжева сетка частиц), которые движутся через эйлерову сетку ячеек. Метод частиц в ячейках и метод крупных частиц позволяют исследовать сложные явления в динамике многокомпонентных сред, частицы хорошо «следят» за свободными поверхностями и линиями раздела сред, взаимодействием разрывов [9]. Этим объясняется широкое применение метода крупных частиц для решения задач механики гетерогенных сред.

Выводы

Таким образом в данной статье рассмотрены некоторые методы моделирования и расчётов процессов акустической сушки капиллярно-пористых материалов. Выполнение расчётов согласно математическим моделям (1), (2) и (5) формирует математический аппарат для расчёта кинетики процесса акустической сушки как в первом, так и во втором периодах, а также акусто-термической сушки. На основе зависимостей, представленных на рис. 1 и рис. 2 можно проводить оптимизацию процесса акустической сушки, варьируя температурой в камере и интенсивностью звукового поля. Расчётные данные, представленные на рис. 2 стыкуются с экспериментальными данными работы [7].

Список литературных источников

1. Жилин А.А., Федоров А.В., Коробейников Ю.Г., Фомин В.М. Математическое моделирование механизма акустической сушки пористых материалов // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44, №5 с. 102-117
2. В.Н. Глазнев, Ю.Г. Коробейников, В.Н. Фомин Акустическая сушка пористых материалов // Современные подходы к исследованию и описанию процессов сушки пористых тел/ Под ред. В.Н. Пармона. – Новосибирск, Изд-во СО РАН 2001. – Гл.5, с.212-239.
3. Лукин С.В. – Динамика волн давления в насыщенных пористых средах. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук// Институт механики уфимского научного центра российской академии наук, Уфа-2007.
4. Нигматулин Р.И. – Основы механики гетерогенных сред// Москва «Наука», главная редакция физико-математической литературы, 1978г., 336 стр.
5. Новый справочник химика и технолога. Общие сведения. Строение вещества. Физические свойства важнейших веществ. Ароматические соединения. Химия фотографических процессов. Номенклатура органических соединений. Техника лабораторных работ. Основы технологии. Интеллектуальная собственность. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 1464 с., ил.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.:Мир, 1982.
7. Борисов Ю.Я., Гынкина Н.М. Акустическая сушка // Физика и техника мощного ультразвука / Под ред. проф. Л.Д. Розенберга. Наука, 1970, с. 580-640.
8. Патент №2062416 – Способ акустической сушки капиллярно-пористых материалов/ Глазнев В.Н., Глинский А.Б., патентообладатель: Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Заявка №94027716, зарегистрирован 20.06.1996г., 6 стр.