

УДК 534.2

Исследование влияния акустической мощности пульсирующего газового потока на процесс сушки сферической частицы: численное моделирование

Зайнутдинова Динара Айдаровна^()*

zajnutdinova-dinara@mail.ru

SPIN-код: 2165-5195

Павлов Григорий Иванович

pavlov16@mail.ru

Бреус Кира Сергеевна

kira.toory@mail.ru

КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

Аннотация. Проведено численное моделирование процесса удаления влаги со сферической пористой частицы под воздействием пульсирующего газового потока. Целью исследования являлось определение влияния акустической мощности пульсаций на время удаления поверхностной и связанной влаги частицы. Исследования проводились на частотах, равных 50, 100, 150, 200 и 250 Гц и амплитудах колебания 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 от средней скорости потока. Акустическая мощность единицы массы газа определялась как произведение частоты колебания на квадрат амплитуды. Моделирование проводилось с использованием метода вычислительной гидродинамики (CFD). Результаты работы могут быть использованы для оптимизации процессов сушки и других технологий, основанных на использовании пульсирующих газовых потоков.

Ключевые слова: пульсирующий поток, пульсации, численное моделирование, сушка, поверхностная влага, связанная влага

Investigation of the influence of acoustic power of a pulsating gas stream on the drying process of a spherical particle: numerical simulation

Zainutdinova Dinara Aidarovna^()*

zajnutdinova-dinara@mail.ru

SPIN-code: 2165-5195

Pavlov Grigory Ivanovich

pavlov16@mail.ru

Breus Kira Sergeevna

kira.toory@mail.ru

KNRTU–KAI named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

Abstract. A numerical simulation of the process of removing moisture from a spherical porous particle under the influence of a pulsating gas stream has been performed. The aim of the study was to determine the effect of the acoustic power of pulsations on the time of removal of surface and bound moisture particles. The studies were carried out at frequencies equal to 50, 100, 150, 200 and 250 Hz and oscillation amplitudes of 0.1; 0.3; 0.5; 0.7; 0.9 of the average flow velocity. The acoustic power of a unit of gas mass was determined as the product of the oscillation frequency and the square of the amplitude. The simulation was carried out using the computational fluid dynamics (CFD) method. The results of the

work can be used to optimize drying processes and other technologies based on the use of pulsating gas flows.

Keywords: pulsating flow, pulsations, numerical modeling, drying, surface moisture, bound moisture

Введение. Взаимодействие потока газа и увлажненной пористой частицы сопровождается тепло- и массообменом, например, при сушке дискретных твердых частиц [1]. Сушка сопровождается тремя периодами: прогрев материала, удаление поверхностной влаги и удаление связанной влаги [2]. При удалении поверхностной влаги (первый период) скорость сушки постоянна и определяется скоростью диффузии паров влаги с поверхности частицы в поток сушильного агента. Далее, начиная со второго периода, скорость сушки падает. Это обусловлено удалением связанной влаги, на которое требуется большое время и которое, фактически, определяет конечное время сушки частицы. Связанная влага удерживается в порах частиц за счет капиллярных сил и сил адсорбции (молекулярно-силового взаимодействия), а также осмотических сил. Разорвать эти связи можно газодинамическим воздействием, интенсивностью которого можно управлять, например, изменением режима обдува частиц газами со стационарного на пульсационный. Анализ литературных сведений показывает, что несмотря на ряд известных работ [3–7], при изучении тепломассообмена между пульсационным газовым потоком и пористой твердой частицей остается много неизученных вопросов. В частности, недостаточно освещен вопрос о дифференцированном воздействии пульсирующих газов на поверхностную и связанную влагу. Крайне редко встречаются работы, в которых влияние пульсаций потока на интенсивность сушки рассматривается с точки зрения акустической мощности.

Целью данной работы являлось исследование влияния акустической мощности единицы массы газа на время удаления поверхностной и связанной влаги из сферической пористой частицы.

Задача решалась численным методом с использованием математической модели, которая была разработана в программной среде COMSOL Multiphysics. Модель верифицировалась сравнением расчетных результатов с экспериментальными данными, полученными на специально разработанном стенде.

Методы и материалы. Тепломассообмен между увлажненной пористой частицей и пульсирующим газовым потоком моделировался в 2D в программной среде COMSOL Multiphysics методом вычислительной гидродинамики (CFD). Данная модель позволяет детально изучать влияние различных параметров газового потока на интенсивность тепло- и массообмена, протекающего между газовой средой и единичной твердой пористой частицей. Схематично рассматриваемый физический процесс показан на рис. 1.

В решаемой задаче моделирование тепломассообмена осуществлялось в рамках нестационарной задачи. В качестве граничных условий на входе в камеру сушки принимались следующие параметры сушильного агента:

температура, относительная влажность, скорость. На выходной границе — условие «выхода» (outflow), предполагающее свободное течение отработанного сушильного агента. Боковые стенки камеры были смоделированы как теплоизолированные, то есть условие «нулевой тепловой поток», а скорость была равна нулю (условие прилипания). Скорость потока воздуха в пульсирующем режиме задавалась с помощью следующего выражения:

$$u = u_0 + A \cdot \sin(2\pi f t),$$

где u_0 — средняя скорость сушильного агента, м/с; A — амплитуда пульсаций скорости, м/с; f — частота пульсаций, Гц; t — время, с.

Подробное описание математической модели приведено авторами в работе [8].

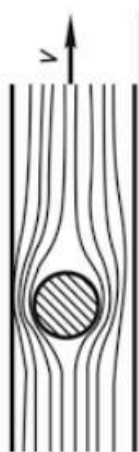


Рис. 1. Схема взаимодействия газового потока с твердой частицей

Результаты и обсуждение. До проведения численных исследований проводились тестовые расчеты с заданными исходными данными, результаты которых верифицировались путем сравнения с данными экспериментов. Эксперименты проводились на установке, которая позволяла накладывать пульсационную составляющую на стационарный поток нагретого потока воздуха. Установка позволяла физически воспроизвести все заданные и рассчитываемые параметры. Описание такой установки приведено в работе [9].

На установке сушка частицы проводилась при следующих исходных данных: скорость газового потока — 1,8 м/с, температура воздушного потока — 120 °С, диаметр частицы — 1 см, начальное влагосодержание частицы — 14,15%, частота пульсаций — 120 Гц, амплитуда пульсаций 0,1 (от средней скорости потока). По экспериментальным результатам строился график зависимости изменения влаги в частице в зависимости от времени (рис. 2). В эту же систему координат были внесены результаты численных исследований, полученных для этих же исходных данных.

Анализ результатов показывает, что экспериментальные данные достаточно близко располагаются к результатам численных исследований. Причем такая картина наблюдается во всем диапазоне изменений влагосодержания. Рас-

хождение результатов в отдельных точках не превышает 18 %. Значения конечного времени сушки, зафиксированные при расчетах и в эксперименте, идеально совпадают и равно 1400 с. На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод, что предлагаемая модель с достаточной точностью описывает тепломассообмен между увлажненной твердой частицей и пульсирующим воздушным потоком. При заданных начальных значениях и принятых граничных условиях результаты расчетов будут достоверны.

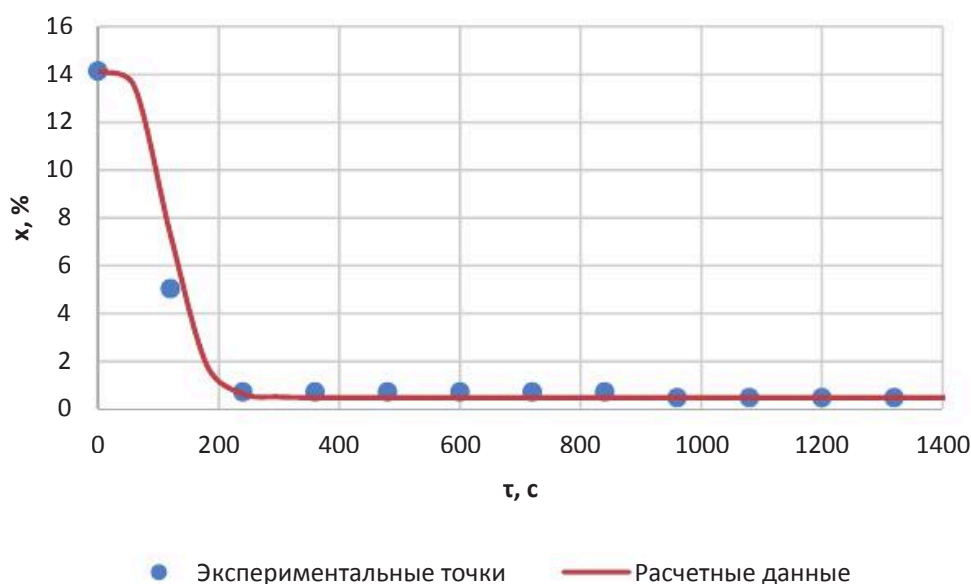


Рис. 2. Графики зависимости влагосодержания частицы от

При моделировании тепломассообмена в газовом потоке с увлажненной пористой частицей были заданы параметры и начальные условия, приведенные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры модели

Параметр	Значение
Теплоемкость частицы c_p , Дж/(кг · К)	1280
Теплопроводность частицы λ , Вт/(м · К)	0,2
Атмосферное давление p_0 , Па	101325
Температура окружающего воздуха, T_0 , К	293,15
Температура потока воздуха T , К	423,15
Средняя скорость потока воздуха u_0 м/с	1,5
Пористость частицы ϵ_p	0,787
Плотность частицы ρ_s , кг/м ³	684
Частота пульсаций f , Гц	50, 100, 150, 200, 250
Амплитуда пульсаций скорости A (от средней скорости потока газа)	0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9

Таблица 2

Начальные условия

Параметр	Значение
Скорость потока воздуха, обдувающего частицу u , м/с	0
Скорость потока воздуха в порах частицы ($u_g = u_l$), м/с	0
Температура потока воздуха T , К	293,15
Температура частицы T_p , К	293,15
Давление p , Па	0
Начальная относительная влажность частицы, %	19
Начальная относительная влажность нагретого потока воздуха, %	1,7

Численно исследовалось влияние акустической мощности единицы массы газа на удаление поверхностной и связанной влаги. Акустическая мощность единицы массы газа определялась как произведение частоты колебания на квадрат амплитуды. Каждой частоте соответствовали 5 значений амплитуд. Результаты представлены в графической форме (рис. 3, 4).

На рис. 3 приведен график зависимости времени удаления поверхностной влаги от акустической мощности.

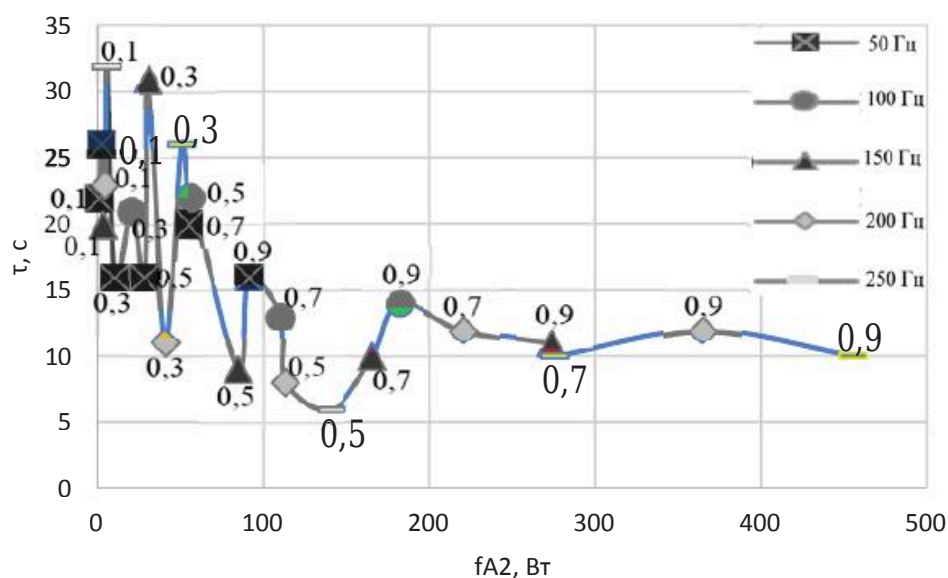


Рис. 3. График зависимости времени удаления поверхностной влаги от акустической мощности (числа на графиках соответствуют амплитудам пульсаций скорости)

На полученном графике можно заметить, что режим обдува и параметры пульсационного потока в сильной степени влияют на скорость удаления поверхностной влаги. В рассмотренном варианте можно выделить наиболее эффективный режим: высокочастотный (150 Гц и более), значения акустической мощности которого составляет 40...455 кг · м²/с. На поверхности пори-

стой частицы и в самой частице при обдуве газовым потоком происходят сложные физические процессы. Они до сих пор до конца не изучены. В связи с этим достоверно обосновать физическую сущность вышерассмотренных эффектов не представляется возможным. Одним из предположений является то, что значения амплитуд, соответствующие наименьшему времени τ , усиливают процессы тепломассообмена вблизи поверхности частицы. Благодаря этому к частице подводится больше сухого воздуха и быстрее от нее отводится увлажненный воздух. В конечном итоге, это может положительно сказаться на скорости сушки.

При исследовании влияния режимов течения воздуха на связанную влагу получены аналогичные характеристики, что и для поверхностной влаги (рис. 4).

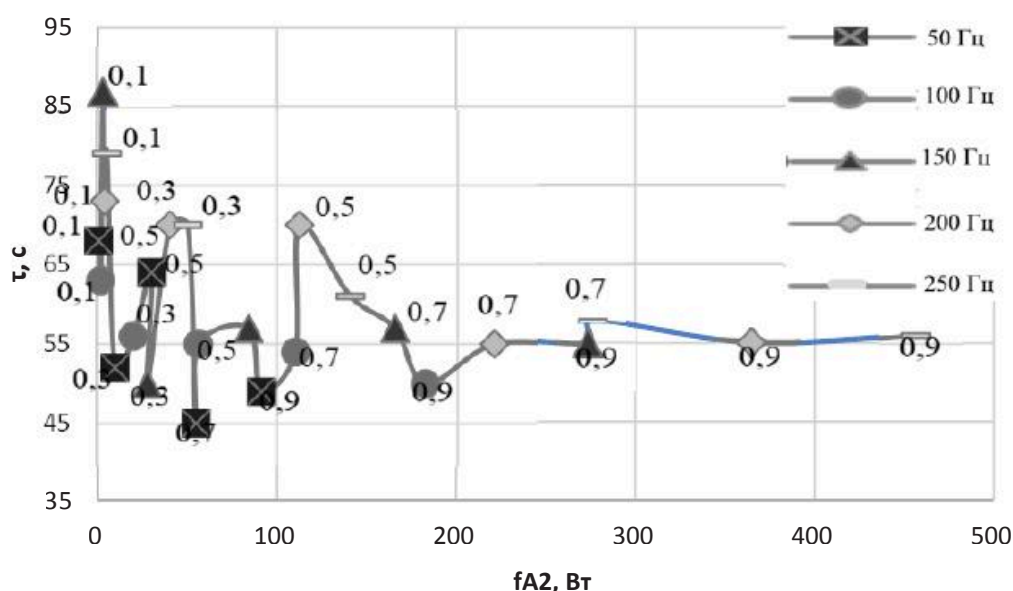


Рис. 4. График зависимости времени удаления связанной влаги от акустической мощности (числа на графиках соответствуют амплитудам пульсаций скорости)

Полученные результаты для удаления связанной влаги существенно отличаются от результатов, полученных для удаления поверхностной влаги:

а) на удаление связанной влаги тратится в 3-5 раз больше времени, чем на удаление поверхностной влаги;

б) наименьшее время, затрачиваемое на удаление связанной влаги, соответствует режиму пульсационного течения газа с частотой 50 Гц и с большими амплитудами колебаний;

в) течение потока воздуха на других колебательных режимах на интенсивность удаления связанной влаги влияет мало. Предполагается, что пульсации газового потока на низких частотах и на больших амплитудах равномерно прогревают частицу за время одного цикла колебания, что создает благоприятные условия для диффузии влаги изнутри к поверхности за счет ослабления капиллярных сил внутри пор. Высокая амплитуда пульсаций газа за счет увеличения статического давления в момент торможения у поверхно-

сти частицы также может способствовать более глубокому проникновению молекул воздуха в поры, улучшая тем самым теплоотдачу и вентиляцию газовой полости.

Выводы. 1. Математические модели, разработанные для исследования тепломассообмена между увлажненной пористой твердой частицей и ламинарным подогретым воздушным потоком, движущимся в стационарном и пульсирующем режимах, адекватно описывают исследуемые процессы. Погрешность результатов расчетов по сравнению с экспериментальными данными не превышает 17 %.

2. Режим обдува и параметры пульсационного потока в сильной степени влияют на скорость удаления поверхностной влаги. Положительный эффект наблюдается в области высоких частот (более 150 Гц).

3. На удаление связанной влаги большое влияние оказывает пульсационное течение газа с частотой 50 Гц и с большими амплитудами колебаний (выше 0,5).

Список источников

- [1] Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Особенности тепломассообмена при сушке пиломатериалов бесступенчатыми режимами. *Хвойные бореальной зоны*, 2019, № 2, с. 139–143.
- [2] Ефремов Г.И. Моделирование кинетики сушки с периодом прогрева. 6-й *Минский Междунар. форум по тепломассопереносу MIF*. Минск, 2008, 6 с.
- [3] Jia D., Cathary O., Peng J. et al. Fluidization and drying of biomass particles in a vibrating fluidized bed with pulsed gas flow. *Fuel Processing Technology*, 2015, vol. 138, pp. 471–482.
- [4] Jin H., Wang S., He Y. Investigation of drying process of non-spherical particle in a pulsed fluidized bed. *Particuology*, 2025, vol. 98, pp. 134–141.
- [5] Каримов А.А., Мукольянц А.А., Сотникова И.В. Влияние пульсирующего потока на интенсификацию тепло- и массообмена. *Современные инновации в науке и технике. 4-я Междунар. науч.-техн. конф.: тез.* Курск, Университетская книга, 2014, т. 2, с. 223–226.
- [6] Chen Li, Carter Blocka, Lifeng Zhang. Experimental investigation on drying performance of pharmaceutical granules in a pulsation-assisted fluidized bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2022, vol. 100, no. 9, pp. 2608–2622.
- [7] Hanyu Jin, Shuai Wang, Yurong He. Investigation of drying process of non-spherical particle in a pulsed fluidized bed. *Particuology*, 2025, vol. 98, pp. 134–141.
- [8] Зайнутдинова Д.А., Павлов Г.И., Теляшов Д.А. Численное исследование взаимодействия пульсирующего сушильного агента с твердой пористой увлажненной частицей. *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*, 2026, т. 12, № 1 (45), с. 63–80. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2026-12-1-63-80>
- [9] Зайнутдинова Д.А., Теляшов Д.А., Накоряков П.В. Лабораторный стенд для формирования в цилиндрической трубе газового потока с пульсационной составляющей. *Актуальные проблемы механики сплошной среды-2025. Всерос. науч. конф. с междунар. уч.* Казань, Казанский ун-т, 2025, с. 214–218.