ПРИМЕНЕНИЕ ANSYS CFD ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОЙ СУШКИ ЧЕСНОКА

Абдураҳмон Миркомилов
Ташкентский химико-технологический институт
mirkomilov03.08@gmail.com
Жасур Сафаров
д.т.н., проф. Ташкентский государственный технический университет
jasursafarov@yahoo.com
Шахноза Султанова
д.т.н., проф Ташкентский государственный технический университет
Заместитель Хокима города Ташкента
sh.sultanova@yahoo.com

Аннотация: Статья посвящена вопросам кинетического моделирования и численному исследованию процесса вибро-конвективной сушки чеснока (Allium sativum L.). Представлены результаты экспериментального и вычислительного анализа процесса, реализованного с помощью программного пакета Ansys CFD (Fluent). Изучалось влияние механической вибрации на интенсивность тепло- и массообмена при сушке чеснока, что позволяет ускорить процесс удаления влаги и сохранить качество продукта. Проведённое исследование позволяет рекомендовать разработанную вычислительную модель для оптимизации и проектирования сушильного оборудования, а также для моделирования аналогичных процессов с другими пищевыми продуктами.

Ключевые слова: чеснок, вибро-конвективная сушка, кинетическое моделирование, Ansys CFD, тепло- и массообмен, сушилка кипящего слоя, качество продукта.

Abstract: The article addresses the kinetic modeling and numerical investigation of the vibro-convective drying process of garlic (Allium sativum L.). The results of experimental and computational analysis implemented using the Ansys CFD (Fluent) software package are presented. The influence of mechanical vibration on the intensity of heat and mass transfer during garlic drying was studied, facilitating accelerated moisture removal and preservation of product quality. The conducted research suggests using the developed computational model for optimization and design of drying equipment, as well as for modeling similar processes involving other food products.

Key words: garlic, vibro-convective drying, kinetic modeling, Ansys CFD, heat and mass transfer, fluidized bed dryer, product quality.

ISSN 3030-3907

Annotatsiya: Maqolada sarimsoqni (Allium sativum L.) vibro-konvektiv quritish jarayonining kinetik modellashtirish va sonli tadqiq qilish masalalari yoritilgan. Ansys CFD (Fluent) dasturiy paketi yordamida amalga oshirilgan eksperimental va hisoblash tahlili natijalari keltirilgan. Mexanik tebranishning sarimsoq quritish jarayonida issiqlik va massa almashinuvi intensivligiga ta'siri o‘rganildi, bu esa namlikni tezroq chiqarishga va mahsulot sifatini saqlashga imkon beradi. Olib borilgan tadqiqot asosida ishlab chiqilgan hisoblash modelidan quritish uskunasini optimallashtirish va loyihalashda, shuningdek, boshqa oziq-ovqat mahsulotlarini quritish jarayonlarini modellashtirishda foydalanish tavsiya qilinadi.

Kalit so‘zlar: sarimsoq, vibro-konvektiv quritish, kinetik modellashtirish, Ansys CFD, issiqlik va massa almashinuvi, qaynaydigan qatlamli quritgich, mahsulot sifati.

ВВЕДЕНИЕ

Чеснок (Allium sativum L.) - это овощ, широко употребляемый во всём мире в качестве ароматизатора и растительного лекарственного средства. Он хорошо известен своими полезными для здоровья свойствами, в основном благодаря различным биоактивным соединениям, таким как аллицин, полисахариды и полифенолы, которые придают чесноку характерный вкус и обеспечивают его биологическую активность. В последнее время всё большую популярность приобретают различные продукты переработки чеснока, такие как сушёные ломтики, чесночный порошок, свежий чеснок, чёрный чеснок и чесночное масло.

В последние годы привлекает внимание виброконвективная сушка, представляющая собой сочетание традиционной конвективной сушки горячим воздухом с механической вибрацией рабочего слоя. Предполагается, что вибрационно-конвективные сушилки (часто реализованные в виде вибрационных сушилок кипящего слоя) обеспечивают более интенсивный массообмен и равномерность сушки за счёт непрерывного перемешивания продукта и разрушения пограничного слоя вокруг частиц. Это позволяет ускорить удаление влаги и предотвратить местный перегрев материала [1].

Удаление влаги может происходить за счет одновременного тепло- и массообмена. Это делается специально для уменьшения содержания воды до уровня, при котором микробная порча и реакции порчи значительно сведены к минимуму. Использование сушки пищевых продуктов широко используется для повышения стабильности пищевых продуктов и минимизации химических и физических изменений во время хранения.

ISSN 3030-3907

Кинетическое моделирование играет решающую роль в пищевых процессах, так как оно помогает изучать параметры различных процессов, включающих химические, физические и биохимические состояния. Эти процессы происходят с умеренной скоростью и имеют свою характерную кинетику. Кинетическое моделирование предоставляет инструмент для количественного анализа изменений, их скорости и ключевых показателей. Для глубокого понимания протекания важно учитывать, как термодинамические, так и кинетические аспекты. Изменение скорости определяется как сочетание факторов, движущих процессов и изменений сопротивления. Таким образом, между термодинамическими и кинетическими процессами в технологии существует неразрывная связь [2-4].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс сушки особенно важен в пищевой промышленности при переработке многих пищевых продуктов. В данной статье основное внимание уделялось разработке вычислительных моделей для моделирования процесса сушки чеснока. В этой статье мы разработали систему моделирования Ansys CFD для моделирования процесса сушки чеснока. Три поддона с общей массой около 1 кг каждый были наполнены чесноком и постоянно проветривались при температуре 30°C и высушивались под воздействием вибрации, что способствует более равномерному распределению тепла и ускоряет процесс сушки, сохраняя при этом качество продукта. Измеряли относительную влажность воздуха на входах и выходах и вес чеснока – для каждого эксперимента определяли степень потери влаги в чесноке. Воздушный поток, тепло- и массообмен в сушильной установке моделировались с помощью программы CFD Ansys Fluent.

Результаты моделирования были сопоставлены с экспериментальными измерениями. Проверенная вычислительная модель используется для моделирования различных режимов работы, включая увеличение количества поддонов и их размеров. Усовершенствованный подход и модели будут полезны при выборе конфигурации сушилки и оптимизации ее дизайна. Разработанные модели для сушки чеснока также могут быть использованы для определения подходящих условий работы при сушке других пищевых продуктов.

В настоящее время чеснок широко используется в производстве колбасно-мясных продукций, медицинской косметологии, фармацевтической промышленности. Одним из основных вопросов является

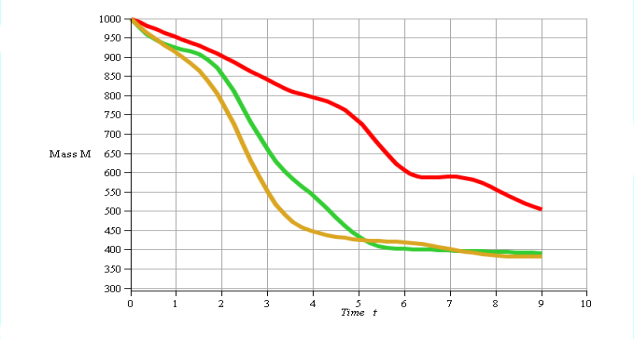
ISSN 3030-3907

доставка этого продукта по удаленному адресу без ущерба для его химического состава, сохраняя его первоначальное состояние [5-12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В этой статье мы рассмотрим математическую модель сушки кусочков чеснока, которые нарезаны на кусочки.

Исследуем на результаты 3-х экспериментов с эффектом воздействия скорости воздушного потока со скоростью 1, 1,5 и 2 м/с на нарезанные кусочки чеснока. Как вы можете видеть, время, затраченное на эксперименты, составило 16, 12 и 9 часов соответственно. В течение первых 9 часов описывается общее изменение трех состояний, отображенных на одном графике (рис. 1).



1-эксперимент показан красным цветом; 2-эксперимент показан зеленым; 3-эксперимент показан желтым.

Рисунок 1. Изменение массы по времени в соответствии с результатами эксперимента.

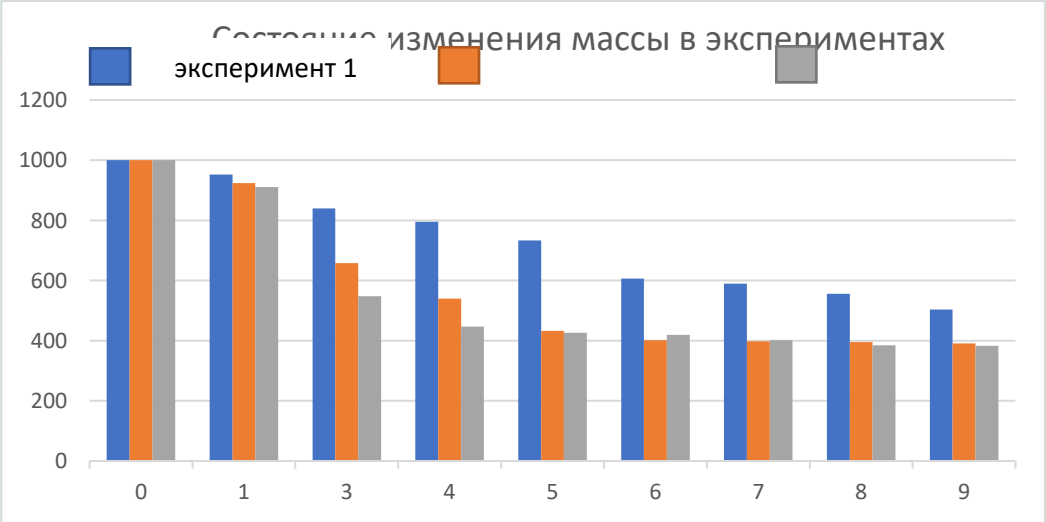


Рисунок 2. Изменение массы в 3 экспериментах за каждый час

На (рис. 1) показано изменение массы за 9 часов. Красным цветом показан эксперимент 1, зеленым – эксперимент 2, желтым – эксперимент 3, график изменения массы во времени. Однако на (рис. 2)

ISSN 3030-3907

показан график изменения массы во времени в результате каждого эксперимента. На двух изображениях выше также видно, что 3-й эксперимент по меркам времени является наиболее удобным. Изменение массы чеснока по времени можно выразить как:

$$m := a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4 + ft^5 \quad (1)$$

Здесь, используя полиномиальный многочлен, мы можем выразить изменение массы во времени через неизменные коэффициенты $a, b, c, d\ e, f$ Нарезанный чеснок представим, как в трех вышеупомянутых экспериментах с изменением массы в течение 9 часов. Для этого мы построим полиномиальный многочлен Лагранжа для каждого часового интервала.

Мы используем формулу интерполяции Лагранжа для узлов интерполяции, заданных произвольным интервалом [13].

Предположим, что имеется $n+1$ различных значений аргумента $x_0, x_1, x_2, x_3 \dots \dots, x_n$и функция $f(x)$ имеет соответствующие значения.

$$f(x_0) = y_0;\ f(x_1) = y_1;\ f(x_2) = y_2, \dots \dots, f(x_n) = y_n \quad (2)$$

Пусть значения будут даны.

Если функция $f(x_i)$ имеет значения, большие n, и задана узлом x_i_i, то есть,

$$L_n(x_i) = x_i \qquad (i = 0..n)$$

Требуется найти многочлен $L_n(x_i)$, в котором находится многочлен Лагранжа $L_n(x_i)$, можно принять искомый многочлен в следующем виде:

$$L_n(x_i) = \sum_{i=1}^{n} y_i \frac{(x-x_o)\cdot(x-x_1)\cdot(x-x_2)\cdot\ldots\cdot(x-x_{i-1})\,(x-x_i)\cdot\ldots\cdot(x-x_o)}{(x_j-x_o)\cdot(x_j-x_1)\cdot(x_j-x_2)\cdot\ldots\cdot(x_j-x_{i-1})\,(x_j-x_i)\cdot\ldots\cdot(x_j-x_o)}. \quad (3)$$

Если узлы интерполяции равноудалены, то интерполяционная формула Лагранжа накладывается на интерполяционную формулу Ньютона.

Например, когда $n = 1$

$$L_1 = y_0 \frac{x-x_1}{x_2-x_1} + y_1 \frac{x-x_2}{x_3-x_2}; \quad (4)$$

когда $n = 2$ принимает вид

$$L_2 = y_0 \frac{(x-x_1)\cdot(x-x_2)}{(x_0-x_1)\cdot(x_0-x_2)} + y_1 \frac{(x-x_o)\cdot(x-x_2)}{(x_1-x_0)\cdot(x_1-x_2)} + y_2 \frac{(x-x_o)\cdot(x-x_1)}{(x_2-x_o)\cdot(x_2-x_1)} \quad (5)$$

Блок-схема интерполяционного полинома Лагранжа:

ISSN 3030-3907

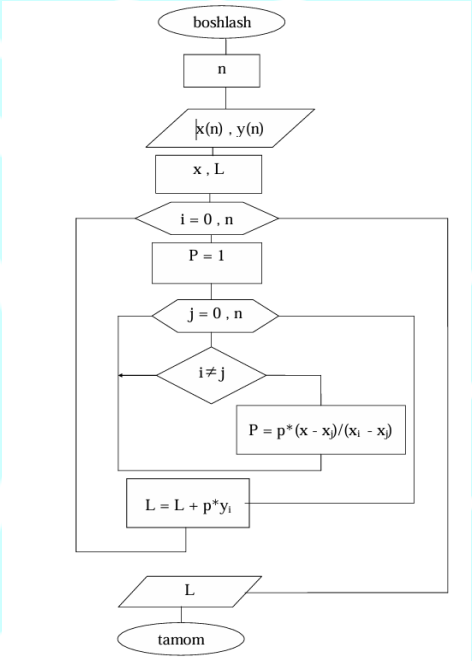


Рисунок 3. Интерполяционная многоблочная схема.

Теперь мы можем сформулировать изменение массы с течением времени, используя интерполяционный полином Лагранжа. Чтобы получить более ясную картину процесса, мы можем построить отдельную функцию для каждого часового интервала. M1, M2, M3 – изменения массы в экспериментах 1, 2 и 3 соответственно

$$M1 = \begin{cases} 1000 - 52{,}42349037t + 4{,}838944674t^2 - 0{,}4154542995t^5 & 0 \le t < 1 \\ 998{,}2142604 - 43{,}49479219t - 13{,}01845169t^2 + 17{,}85739636t^3 - 8{,}92869818t^4 + 1{,}370285337t^5 & 1 \le t < 2 \\ 1077{,}200005 - 240{,}9591542t + 184{,}4459103t^2 - 80{,}87478463t^3 + 15{,}75434707t^4 - 1{,}098019188t^5 & 2 \le t < 3 \\ 1624{,}663793 - 1153{,}3988t + 792{,}7390074t^2 - 283{,}6391503t^3 + 49{,}54840802t^4 - 3{,}350956585t^5 & 3 \le t < 4 \\ -14486{,}06108 + 18985{,}00729t - 9276{,}464036t^2 + 2233{,}66161t^3 - 265{,}1141871t^4 + 12{,}38217317t^5 & 4 \le t < 5 \\ 85443{,}08716 - 80944{,}14095t + 30695{,}19526t^2 - 5760{,}670249t^3 + 534{,}3189988t^4 - 19{,}59515427t^5 & 5 \le t < 6 \\ -202802{,}5515 + 159260{,}558t - 49373{,}03771t^2 + 7584{,}035246t^3 - 577{,}7397924t^4 + 17{,}47347211t^5 & 6 \le t < 7 \\ 235677{,}1389 - 153939{,}2209t + 40112{,}61339t^2 - 5199{,}629197t^3 + 335{,}3790964t^4 - 8{,}615639001t^5 & 7 \le t < 8 \\ 1077{,}200005 - 240{,}9591542t + 184{,}4459103t^2 - 80{,}87478463t^3 + 15{,}75434707t^4 - 1{,}098019188t^5 & 8 \le t < 9 \end{cases} \quad (6)$$

$$M2 = \begin{cases} 1000 - 136{,}5076459t + 65{,}31186665t^2 - 4{,}804220769t^5 & 0 \le t < 1 \\ 978{,}4971102 - 28{,}99319711t - 149{,}7170309t^2 + 215{,}0288975t^3 - 107{,}5144488t^4 + 16{,}69866899t^5 & 1 \le t < 2 \\ 2288{,}919114 - 3305{,}048205t + 3126{,}337977t^2 - 1422{,}998607t^3 + 301{,}9924273t^4 - 24{,}25201862t^5 & 2 \le t < 3 \\ -8836{,}247097 + 15236{,}89548t - 9234{,}957812t^2 + 2697{,}433323t^3 - 384{,}7462277t^4 + 21{,}53055838t^5 & 3 \le t < 4 \\ 29106{,}04592 - 32190{,}97079t + 14478{,}97532t^2 - 3231{,}049961t^3 - 265{,}1141871t^4 + 12{,}38217317t^5 & 4 \le t < 5 \\ -48842{,}20306 + 45757{,}27819t - 16700{,}32427t^2 + 3004{,}809957t^3 - 534{,}3189988t^4 - 19{,}59515427t^5 & 5 \le t < 6 \\ -55561{,}4144 - 41245{,}73636t + 12300{,}68058t^2 - 1828{,}690851t^3 + 135{,}5199250t^4 - 4{,}005413604t^5 & 6 \le t < 7 \\ -35450{,}30086 + 23762{,}63168t - 6273{,}13886t^2 + 824{,}7119267t^3 - 54{,}00884484t^4 + 1{,}409694105t^5 & 7 \le t < 8 \\ 34260{,}23095 - 19806{,}45070t + 4619{,}131737t^2 - 536{,}8218979t^3 + 31{,}08701919t^4 - 0{,}717702496t^5 & 8 \le t < 9 \end{cases} \quad (7)$$

$$M3 = \begin{cases} 1000 - 110{,}0028618t + 24{,}49880761t^2 - 3{,}495945761t^5 & 0 \le t < 1 \\ 983{,}1192424 - 25{,}59907372t - 144{,}3087686t^2 + 168{,}8075763t^3 - 84{,}40378813t^4 + 13{,}38481186t^5 & 1 \le t < 2 \\ 2043{,}922664 - 2677{,}607628t + 2507{,}699786t^2 - 1157{,}196701t^3 + 247{,}0972812t^4 - 19{,}76529507t^5 & 2 \le t < 3 \\ -6135{,}045259 + 10954{,}00558t - 6580{,}042351t^2 + 1872{,}050678t^3 - 257{,}7772819t^4 + 13{,}89300914t^5 & 3 \le t < 4 \\ 13434{,}55207 - 13507{,}99109t + 5650{,}95598t^2 - 1185{,}698905t^3 + 124{,}4414159t^4 - 5{,}217925752t^5 & 4 \le t < 5 \\ -9872{,}485399 + 9799{,}046385t - 3671{,}859008t^2 + 678{,}8640926t^3 - 62{,}01488385t^4 + 2{,}240326238t^5 & 5 \le t < 6 \\ 17799{,}58772 - 13261{,}01455t + 4014{,}827971t^2 - 602{,}2504038t^3 + 44{,}74465751t^4 - 1{,}318325141t^5 & 6 \le t < 7 \\ -7516{,}922001 + 4822{,}206681t - 1151{,}806667t^2 + 135{,}8402588t^3 - 7{,}976104095t^4 + 0{,}187982334t^5 & 7 \le t < 8 \\ -4350{,}871714 + 2843{,}425251t - 657{,}1113094t^2 + 74{,}00333908t^3 - 4{,}111296616t^4 + 0{,}091362147t^5 & 8 \le t < 9 \end{cases} \quad (8)$$

ISSN 3030-3907

Уравнения (6), (7) и (8) сформулированы с использованием метода интерполяции Лагранжа и описывают зависящее от времени состояние изменения массы продукта в каждом часовом интервале.

Если на продукт влияет температура, изменение массы также зависит от состава продукта. Тот факт, что коэффициенты в приведенных выше уравнениях (6), (7) и (8) различны, наглядно иллюстрирует эту ситуацию.

Мы знаем, что чеснок примерно на 60% состоит из воды, на 29,8-30% – из углеводов, на 0,5-1% – из жиров, а остальное – из других веществ. В случае 3, где мы проводили эксперимент, влажность в исходном состоянии составляла в среднем 62%, а когда остались последние 385 г, средняя влажность составила 15% [14].



Рисунок 4. Состояние чеснока перед сушкой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были получены следующие результаты в процессе сушки чеснока:

- проведен полный анализ состава чеснока до и после сушки.
- графически проанализированы 3 состояния чеснока в процессе сушки, сравнивалось состояние первых 9 часов.
- закон изменения массы искался в полиномиальной форме полинома 5-й степени. Каждый член полинома определялся для каждого часа.
- результаты изменения массы чеснока с использованием метода интерполяции Лагранжа были получены для 3 процессов сушки с интервалом в каждый час.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jing Liu, Yuanyuan Liu, Xiangli Li, Jiubin Zhu, Xiaomin Wang, Longchuan Ma. Drying characteristics, quality changes, parameters optimization and flavor analysis for microwave vacuum drying of garlic (Allium sativum L.) slices. LWT – Food Science and Technology 173 (2023) 114372

ISSN 3030-3907

2. Uwem Ekwere Inyang, Innocent Oseribho Oboh, Benjamin Reuben Etuk. Kinetic models for drying techniques – food materials. Advances in Chemical Engineering and Science. 2018, №8. P.27-48.

3. Ertekin C., Yaldiz O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. Journal of Food Engineering, 63, 2004. P.349-359.

4. Boekel M.A.J.S.V., Tijskens L.M.M. Kinetics modelling. Chapter Three, Wageningen University, Wageningen.

5. Yun H.-M., Ban J.O., Park K.-R., Lee C.K., Jeong H.-S., Hzn S.B., Hong J.T. Potential therapeutic effects of functional active compounds isolated from garlic // Pharmacology & Therapeutics. 2014. Vol. 142. Pp. 183–195. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2013.12.005.

6. Batiha G.-Yel-S., Beshbishu A.M., Wasef L.G., Elewa Y.H.A., Al-Sagan A.A., El-Hack M.E.A., Taha A.E., Abd-Yel hakim Y.M., Devkota H.P. Chemical Constituents and Pharmacological Activities of Garlic (Allium sativum L.): A Review // Nutrients. 2020. Vol. 12. Pp. 872–893. DOI: 10.3390/ nu12030872

7. Столбова Т.М., Малыхина О.В., Жаркова С.В. Элементы урожайности и биохимический состав луковиц чеснока озимого в зависимости от условий растительности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 12(170). С. 11–16. DOI: 10.24411/2500-1000-2019-11596.

8. Boukeria S., Kadi K., Kalleb R., Benbott A., Yahia A. Phytochemical and physicochemical characterization of Alliom sativum L. and Alloum cepa L. Essential oils // J. Mater. Environ. Sci. 2016. Vol. 7. Pp. 2362–2368.

9. Gupta V.K., Charma S.K. Plants as natural Antioxidants // Natural Product Radiance. 2006. Vol. 5. N4. Pp. 326–334.

10. Bozin B., Mimica-Dukic N., Samojlik I., Goran A., Igic R. Phenolics as antioxidants in garlic (Allium sativum L, Alliaceae) // Food Chemistry. 2008. Vol. 111. Pp. 925–929. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.04.071

11. Семенов А.А., Карцев В.Г. Биологическая активность природных соединений. Москва, 2012. 513 с.

12. Cacas J.-L, Furt F., Le Guédard M., Schmitter J.-M., Buré C., Gerbeau-Pissot P., Moreau P., Bessoule J.-J., Simon Plas F., Mongrand S. Lipids of plant membrane rafts // Progress in Lipid Research. 2012. Vol. 51. Pp. 272–299. DOI: 10.1016/j.plipres.2012.04.001.

13. М. А. Тынкевич. Глава 7.6.1. Лагранжева многомерная интерполяция // Численные методы анализа. — Кемерово, 2002. — ISBN 5-89070-042-1.

ISSN 3030-3907

14. A.Mirkomilov, J.Safarov, Sh.Sultonova - Amino Acid Components of Garlic Under Various Drying Methods, American Journal of Technology Advancement. Vol.2, No.5 (May, 2025).

ISSN 3030-3907