

Проблемы при моделировании процессов увлажнения зернового сырья

Димова А.П., Фролов Д.И.

Аннотация. В статье рассмотрен обзор различных способов и технологий применяемых при моделировании процессов, происходящих во время гидратации (увлажнения) зернового сырья и бобовых. Представлены основные модели, используемые при моделировании процессов массопереноса в твердых телах. Рассмотрены способы моделирования, применяемые различными авторами и описаны структура и состояние материала и их физические свойства.

Ключевые слова: гидратация, моделирование, физические модели, структура, зерно, бобовые.

Для цитирования: Димова А.П., Фролов Д.И. Проблемы при моделировании процессов увлажнения зернового сырья // Инновационная техника и технология. 2023. Т. 10. № 1. С. 59–63.

Problems in modeling the processes of moistening of grain raw materials

Dimova A.P., Frolov D.I.

Abstract. The article considers an overview of various methods and technologies used in modeling the processes occurring during the hydration (moisturizing) of grain raw materials and legumes. The main models used in modeling mass transfer processes in solids are presented. The modeling methods used by various authors are considered and the structure and state of the material and their physical properties are described.

Keywords: hydration, modeling, physical models, structure, grain, legumes.

For citation: Dimova A.P., Frolov D.I. Problems in modeling the processes of moistening of grain raw materials. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2023. Vol. 10. No. 1. pp. 59–63. (In Russ.).

Введение

В отличие от сушки, гидратация представляет собой процесс увеличения содержания воды в материале. Эта операция является важным этапом в нескольких процессах, связанных с зерновыми (зерновыми и бобовыми), которые обычно собирают всухую. Замачивание оказывает положительное влияние на физико-химические и питательные свойства зерна и требуется для последующих промышленных операций, таких как варка, экстракция, ферментация, проращивание и соложение. Например, гидратация помогает сократить время приготовления зерна (например, бобов и риса) и способствует однородной желатинизации крахмала и денатурации белков во время приготовления, а также улучшает инактивацию антипитательных факторов [9]. С точки зрения явлений переноса гидратация представляет собой процесс массопереноса, обусловленный различной активностью воды и зависящий от структуры и состояния материала. В

целом зерна представляют собой сложную и неоднородную структуру с различными тканями и компонентами, поэтому диффузия может быть не единственным механизмом транспорта воды. Например, капиллярное течение через поры и каналы играет важную роль при гидратации [9]. Кроме того, при рассмотрении материалов, богатых крахмалом, диффузию можно разделить на три категории в зависимости от значения n в соотношении:

$$X_w \propto t^n, \quad (1)$$

где X_w - доля воды, захваченная твердой матрицей, t - время диффузии [13]:

- 1) $n = 0,5$, диффузия Фика в эластичном состоянии;
- 2) $n > 1$, диффузия в стеклообразном состоянии;
- 3) $0,5 < n < 1$, нефиковская диффузия вблизи стеклования.

Поглощение воды приводит к значительному расширению материала, т. е. набуханию [6]. Это явление возникает в микромасштабе из-за включе-

ния воды в микроструктуру зерен, образованную биополимерами, такими как белки и крахмал, и макроскопически наблюдается по изменениям объема и формы зерен вместе с изменениями текстуры (размягчение). В то же время набухание биополимеров может влиять на транспорт воды из-за изменения механического поведения. В связи с этим при проведении гидратации при высоких температурах (>50-60°C) может происходить клейстеризация крахмала и денатурация белков, что усложняет процесс [13]. Из-за его промышленной значимости важно моделировать гидратацию зерна, чтобы лучше проектировать, оптимизировать и контролировать процесс. В этом смысле применялись различные подходы к рассмотрению явления набухания.

Во-первых, рассмотрим эмпирические модели, направленные на прогнозирование эволюции общего набухания зерен в процессе гидратации. Например, эмпирические соотношения, обычно используемые для прогнозирования поглощения воды во время замачивания, применялись для отслеживания изменений размеров зерна [20]. Были протестированы два соотношения для моделирования расширения зерен риса во время приготовления с избытком воды в зависимости от времени, например, экспоненциальное уравнение и модель степенного типа для прогнозирования относительного расширения из-за количества поглощенной воды. Авторы обнаружили, что набухание было неравномерным, т. е. большее расширение было зарегистрировано в латеральном направлении по сравнению с продольным направлением, и сообщили, что большее расширение наблюдалось у сортов риса с высоким содержанием амилозы. То есть набухание не было изотропным и зависело от особенностей строения рисовых зерен. Точно так же авторы [7] оценили пять моделей, чтобы соответствовать коэффициенту расширения рисовых зерен в зависимости от времени замачивания при различных температурах (25-70 °C): уравнение Пелега, решение уравнения диффузии (экспоненциальная функция), модель Вейбулла и два различных сигмоидальных уравнения. В целом во всех случаях были получены хорошие результаты подгонки, но модели лишены физического смысла, а параметры зависят от конкретных экспериментальных условий.

С другой стороны, авторы [17] использовали два подхода для моделирования линейного (длина, ширина и толщина) и объемного расширения семян нута в зависимости от поглощения воды при замачивании при различных температурах (20-100 °C). Первый подход был основан на экспериментальной корреляции между изменением объема и водопоглощением нута при замачивании, выраженной следующим образом:

$$V - V_0 = \lambda \frac{(M - M_0)}{\rho_w} \quad (2)$$

где V - объем нута в момент времени t ;

V_0 - первоначальный объем;
 M - вес нута в момент времени t ;
 M_0 - первоначальный вес;

ρ_w - плотность воды,
 λ — коэффициент объемного расширения.

Если $\lambda = 1$, увеличение объема равно объему

поглощенной воды, т. е. предположение об идеальном набухании или объемной аддитивности (аналогично рассмотренной выше идеальной или свободной усадке). Однако все найденные значения были меньше 1, например, 0,73-0,95 для разных температур.

Второй подход заключался в решении уравнений:

$$\varepsilon = \varepsilon_{cl} + \varepsilon_M \quad (3)$$

где ε - общая деформация;

ε_{cl} - механическая или упругая деформация;

ε_M - деформация усадки или влажности.

$$\varepsilon_M = \beta (X - X_0) \quad (4)$$

где β - коэффициент объемной усадки;

X - градиент содержания воды;

X_0 - начальное содержание воды.

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial X} \quad (5)$$

где V - объем образца.

В этом случае различные значения коэффициента расширения были получены при использовании объема, длины, ширины и толщины нута, что указывает на анизотропное набухание. Кроме того, исследователи [17] проанализировали изменение различных коэффициентов расширения с температурой. В целом все коэффициенты линейно уменьшались в диапазоне 20-50°C, а затем оставались постоянными в диапазоне 70-100°C. Авторы указали, что клейстеризация крахмала, происходящая при температуре около 60 °C, может объяснить такое поведение при набухании нута.

Во-вторых, мы суммируем физические и гибридные модели, применяемые для прогнозирования набухания зерен. Принимая во внимание структуру макромасштаба, некоторые исследователи применили формулировку, подобную той, что описана авторами [1] для моделирования сопряженного переноса воды и малой деформации при обезвоживании, т.е. уравнения 3-5. Например, авторы [14] использовали реалистичную трехмерную геометрию риса, полученную из томографических изображений, для имитации гигроскопического набухания во время замачивания при различных температурах. Закон Гука (линейная упругость)

использовался для моделирования упругой деформации материала, а закон Фика - для описания переноса воды. Авторы стремились лучше понять развитие внутренних напряжений вследствие набухания, приводящего к растрескиванию и поломке зерен при замачивании [15]. С помощью предложенной модели можно было бы оптимизировать процесс замачивания, чтобы избежать поломки, что может привести к потере текстуры и, следовательно, качества риса. Аналогичная формула также использовалась для моделирования поглощения воды желтым горохом на этапе замачивания процесса соложения с целью выбора оптимальных температурно-временных условий на этом критическом этапе [8]. В этом случае предполагалось, что горох остается сферическим при гидратации (равномерном расширении) и ведет себя как упругий материал, т. е. для зависимости напряжения от деформации использовался закон Гука. Сообщалось, что в другом примере с использованием упомянутого состава моделируется поглощение воды и гигроскопическое набухание лущеных зерен ячменя во время приготовления консервированной каши [19]. Снова предполагалось линейное упругое поведение, но механические свойства рассматривались как функции температуры стеклования. Как упоминалось выше, эти модели не использовали основу большой деформации, а рассматривали малую деформацию зерен.

Другие исследователи применили более сложные концепции и подходы к моделированию и лучшему пониманию набухания материалов. Например, двухмасштабная термомеханическая теория для ненасыщенного набухающего пористого материала была разработана с учетом большой деформации и вязкоупругого поведения твердой матрицы [21]. Затем эта теория была применена к модели варки макаронных изделий, т. е. замачивания при температуре кипения [22]. Другой интересный подход был разработан авторами [18]: новый метод решетки-Больцмана с деформирующей решеткой был использован для моделирования одномерного набухания гелеобразных материалов; модель предполагала, что изменения объема происходят только из-за потери/притока воды. Автор стремился предоставить адекватное описание набухания материала клеточной стенки для дальнейшего развития многомасштабной модели моделирования гидратации пористых пищевых продуктов. Кроме того, хорошее введение в метод Решетки-Больцмана дано в статье [18]. Последний пример этих сложных подходов, основанных на физике, включает использование перспективы мягкого конденсированного вещества для моделирования кинетики гидратации фасоли темно-синего цвета [5]. Уравнение Флори-Хаггинса использовали для описания осмотического давления, создаваемого смесью полимер-растворитель (т.е. белок-вода), а набухание моделировали как задачу с подвижной границей, предполагая объемную аддитивность. Стоит отметить, что последние два

примера можно рассматривать в данной работе как гибридные модели, поскольку изменение объема не описывалось с помощью механической модели. Тем не менее, мы считаем, что эти передовые концепции и рамки, которые в основном применяются в других областях, могут стать источником вдохновения для разработки физических моделей в пищевой промышленности.

Гибридные модели набухания зерен в целом широко стали использоваться в последнее время. Например, в следующих примерах предполагался перенос воды по закону Фика с использованием эффективного коэффициента диффузии влаги, а изменение объема моделировалось упрощенным способом без механической формулировки. Авторы предложили решать моделирование изменения объема. Для случая кипячения риса с избытком воды предложили эмпирическую линейную зависимость между размерами и содержанием влаги в зерне [2]. Это соотношение использовалось для обновления области моделирования на каждом временном шаге в соответствии с водопоглощением. Аналогичное решение было использовано в статьях [10], хотя эмпирическая связь включала радиус сферы и время гидратации. В этом смысле авторы [16] предложили физически последовательное простое выражение для изменения среднего диаметра зерна в зависимости от времени выдержки, учитывая значения в начальное и равновесное время гидратации. С другой стороны, предполагалось, что равномерное набухание и объемная аддитивность создают уравнение для изменения радиуса сферы со временем для моделирования замачивания риса [6, 3]. Аналогичные предположения были сделаны в статье [4] чтобы связать системы Эйлера и Лагранжа для расчета скорости твердого тела из-за набухания. Исследователи [12] также использовали баланс массы для получения дифференциального уравнения для изменения радиуса во времени, но они включали выражение диффузионного потока, оцененного на поверхности, чтобы учесть все накопление массы внутри зерна.

Выводы

Таким образом, существуют некоторые проблемы, которые необходимо заполнить в моделировании увлажнения зерна, особенно при рассмотрении моделей, основанных на физике в макромасштабе. Необходимы дополнительные исследования с учетом следующих аспектов: анализ больших деформаций и нелинейные механические модели; неидеальное и анизотропное или неравномерное набухание; влияние стеклования и состава на механические свойства зерен. Стоит напомнить о важности разработки точных моделей для лучшего проектирования и оптимизации этого процесса, поскольку он применяется к основным продуктам питания, таким как рис, и продуктам, богатым растительным белком, таким как бобовые.

Литература

- [1] Aregawi W. A. et al. Modeling of coupled water transport and large deformation during dehydration of apple tissue //Food and Bioprocess Technology. – 2013. – Т. 6. – С. 1963-1978.
- [2] Bakalis S. et al. Modeling of rice hydration using finite elements //Journal of Food Engineering. – 2009. – Т. 94. – №. 3-4. – С. 321-325.
- [3] Bello M. et al. Modeling water uptake in a cereal grain during soaking //Journal of Food Engineering. – 2010. – Т. 97. – №. 1. – С. 95-100.
- [4] Briffaz A. et al. Modelling of water transport and swelling associated with starch gelatinization during rice cooking //Journal of food engineering. – 2014. – Т. 121. – С. 143-151.
- [5] Chapwanya M., Misra N. N. A soft condensed matter approach towards mathematical modelling of mass transport and swelling in food grains //Journal of Food Engineering. – 2015. – Т. 145. – С. 37-44.
- [6] Dutta A. et al. Numerical modeling of water uptake in white rice (*Oryza sativa* L.) using variable diffusivity approach //Biosystems Engineering. – 2020. – Т. 191. – С. 116-128.
- [7] Hu Z. et al. Kinetics of water absorption expansion of rice during soaking at different temperatures and correlation analysis upon the influential factors //Food Chemistry. – 2021. – Т. 346. – С. 128912.
- [8] Mercier S. et al. Modeling of the water absorption during the steeping of yellow peas //Food and Bioproducts Processing. – 2015. – Т. 94. – С. 20-28.
- [9] Miano A. C., Augusto P. E. D. The hydration of grains: A critical review from description of phenomena to process improvements //Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2018. – Т. 17. – №. 2. – С. 352-370.
- [10] Nicolin D. J. et al. Hsu model analysis considering grain volume variation during soybean hydration // Journal of food engineering. – 2012. – Т. 111. – №. 3. – С. 496-504.
- [11] Nicolin D. J., Jorge R. M. M., Jorge L. M. M. Evaluation of distributed parameters mathematical models applied to grain hydration with volume change //Heat and Mass Transfer. – 2015. – Т. 51. – С. 107-116.
- [12] Nicolin D. J., Jorge R. M. M., Jorge L. M. M. Moving boundary modeling of conventional and transgenic soybean hydration: Moisture profile and moving front experimental validation //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Т. 90. – С. 568-577.
- [13] Ozturk O. K., Takhar P. S. Water transport in starchy foods: Experimental and mathematical aspects //Trends in Food Science & Technology. – 2018. – Т. 78. – С. 11-24.
- [14] Perez J. H., Tanaka F., Uchino T. Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in japonica rice grains under various isothermal soaking conditions //Food Research International. – 2011. – Т. 44. – №. 9. – С. 2615-2623.
- [15] Perez J. H., Tanaka F., Uchino T. Modeling of mass transfer and initiation of hygroscopically induced

References

- [1] Aregawi W. A. et al. Modeling of coupled water transport and large deformation during dehydration of apple tissue //Food and Bioprocess Technology. - 2013. - Т. 6. - pp. 1963-1978.
- [2] Bakalis S. et al. Modeling of rice hydration using finite elements // Journal of Food Engineering. - 2009. - Т. 94. - No. 3-4. - pp. 321-325.
- [3] Bello M. et al. Modeling water uptake in a cereal grain during soaking // Journal of Food Engineering. - 2010. - Т. 97. - No. 1. - pp. 95-100.
- [4] Briffaz A. et al. Modeling of water transport and swelling associated with starch gelatinization during rice cooking // Journal of food engineering. - 2014. - Т. 121. - pp. 143-151.
- [5] Chapwanya M., Misra N. N. A soft condensed matter approach towards mathematical modeling of mass transport and swelling in food grains // Journal of Food Engineering. - 2015. - Т. 145. - pp. 37-44.
- [6] Dutta A. et al. Numerical modeling of water uptake in white rice (*Oryza sativa* L.) using variable diffusivity approach //Biosystems Engineering. - 2020. - Т. 191. - pp. 116-128.
- [7] Hu Z. et al. Kinetics of water absorption expansion of rice during soaking at different temperatures and correlation analysis upon the influential factors //Food Chemistry. - 2021. - Т. 346. - p. 128912.
- [8] Mercier S. et al. Modeling of the water absorption during the steeping of yellow peas //Food and Bioproducts Processing. - 2015. - Т. 94. - pp. 20-28.
- [9] Miano A. C., Augusto P. E. D. The hydration of grains: A critical review from description of phenomena to process improvements // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. - 2018. - Т. 17. - No. 2. - pp. 352-370.
- [10] Nicolin D. J. et al. Hsu model analysis considering grain volume variation during soybean hydration // Journal of food engineering. - 2012. - Т. 111. - No. 3. - pp. 496-504.
- [11] Nicolin D. J., Jorge R. M. M., Jorge L. M. M. Evaluation of distributed parameters mathematical models applied to grain hydration with volume change //Heat and Mass Transfer. - 2015. - Т. 51. - pp. 107-116.
- [12] Nicolin D. J., Jorge R. M. M., Jorge L. M. M. Moving boundary modeling of conventional and transgenic soybean hydration: Moisture profile and moving front experimental validation // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2015. - Т. 90. - pp. 568-577.
- [13] Ozturk O. K., Takhar P. S. Water transport in starchy foods: Experimental and mathematical aspects //Trends in Food Science & Technology. - 2018. - Т. 78. - pp. 11-24.
- [14] Perez J. H., Tanaka F., Uchino T. Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in japonica rice grains under various isothermal soaking conditions //Food Research International. - 2011. - Т. 44. - No. 9. - pp. 2615-2623.
- [15] Perez J. H., Tanaka F., Uchino T. Modeling of mass transfer and initiation of hygroscopically induced

- cracks in rice grains in a thermally controlled soaking condition: with dependency of diffusion coefficient to moisture content and temperature—a 3D finite element approach //Journal of Food Engineering. – 2012. – Т. 111. – №. 3. – С. 519-527.
- [16] Pramiu P. V. et al. Modeling grains hydration considering volumetric variations of spherical and elliptical geometries //Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Т. 166. – С. 105007.
- [17] Sayar S., Turhan M., Koksel H. Expansion in chickpea (*Cicer arietinum* L.) seed during soaking and cooking // International agrophysics. – 2016. – Т. 30. – №. 1.
- [18] Van der Sman R. G. M. Moisture transport during cooking of meat: An analysis based on Flory–Rehner theory //Meat science. – 2007. – Т. 76. – №. 4. – С. 730-738.
- [19] Wang L. et al. Numerical simulation of water absorption and swelling in dehulled barley grains during canned porridge cooking //Processes. – 2018. – Т. 6. – №. 11. – С. 230.
- [20] Yadav B. K., Jindal V. K. Dimensional changes in milled rice (*Oryza sativa* L.) kernel during cooking in relation to its physicochemical properties by image analysis //Journal of Food Engineering. – 2007. – Т. 81. – №. 4. – С. 710-720.
- [21] Zhu H. et al. A model for flow and deformation in unsaturated swelling porous media //Transport in porous media. – 2010. – Т. 84. – С. 335-369.
- [22] Zhu H., Mukherjee S., Dhall A. A finite element analysis of coupling between water absorption and swelling of foodstuffs during soaking //Transport in porous media. – 2011. – Т. 88. – С. 399-419.
- cracks in rice grains in a thermally controlled soaking condition: with dependency of diffusion coefficient to moisture content and temperature—a 3D finite element approach //Journal of food engineering. - 2012. - Т. 111. - No. 3. - pp. 519-527.
- [16] Pramiu P. V. et al. Modeling grains hydration considering volumetric variations of spherical and elliptical geometries //Computers and Electronics in Agriculture. - 2019. - Т. 166. - p. 105007.
- [17] Sayar S., Turhan M., Koksel H. Expansion in chickpea (*Cicer arietinum* L.) seed during soaking and cooking // International agrophysics. - 2016. - Т. 30. - No. 1.
- [18] Van der Sman R. G. M. Moisture transport during cooking of meat: An analysis based on Flory–Rehner theory // Meat science. - 2007. - Т. 76. - No. 4. - pp. 730-738.
- [19] Wang L. et al. Numerical simulation of water absorption and swelling in dehulled barley grains during canned porridge cooking //Processes. - 2018. - Т. 6. - No. 11. - pp. 230.
- [20] Yadav B. K., Jindal V. K. Dimensional changes in milled rice (*Oryza sativa* L.) kernel during cooking in relation to its physicochemical properties by image analysis // Journal of Food Engineering. - 2007. - Т. 81. - No. 4. - pp. 710-720.
- [21] Zhu H. et al. A model for flow and deformation in unsaturated swelling porous media //Transport in porous media. - 2010. - Т. 84. - pp. 335-369.
- [22] Zhu H., Mukherjee S., Dhall A. A finite element analysis of coupling between water absorption and swelling of foodstuffs during soaking //Transport in porous media. - 2011. - Т. 88. - pp. 399-419.

Сведения об авторах

Information about the authors

| | |
|---|---|
| <p>Димова Анна Петровна студент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11</p> | <p>Dimova Anna Petrovna student of the department «Food productions» Penza State Technological University</p> |
| <p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p> | <p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p> |