Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 12.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 664.854:664.844

Системно-смысловой анализ физико-химических и межфазных энерго- и массообменных процессов при переработке плодов и овощей

Курбанова Мадина Джамшедовна
PhD, ст. преп
Ташкентский государственный аграрный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: madinaqurbonova@mail.ru

Курбанов Жамшед Мажидович
д-р техн. наук, проф.
Самаркандский институт экономики и сервиса
Республика Узбекистан, г. Самарканд

Додаев Кучкор Одилович
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

System-semantic analysis of physicochemical and interfacial energy and mass transfer processes in fruit and vegetable processing

Kurbanova Madina Dzhamshidovna
PhD, Senior Lecturer
Tashkent State Agrarian University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Kurbanov Dzhamshid Majidovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Samarkand Institute of Economics and Service
Republic of Uzbekistan, Samarkand

Dodaev Kuchkor Odilovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования — систематизировать взаимосвязи физико-химических, межфазных, энергетических и массопереносных явлений, формирующих структуру процесса тепловой обработки и сушки плодоовощного сырья, и представить их в виде структурной схемы третьего уровня иерархии системно-смыслового анализа. Методологическую основу

Библиографическое описание: Курбанова М.Д., Курбанов Ж.М., Додаев К.О. Системно-смысловой анализ физико-химических и межфазных энерго- и массообменных процессов при переработке плодов и овощей // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23534

составили многоуровневый системно-смысловой анализ, элементы топологии и теории ориентированных графов, а также причинно-следственная декомпозиция процессов переноса энергии и массы. В качестве ключевых переменных рассмотрены поля температуры, влагосодержания и давления, изменение поверхностного напряжения, положение зоны испарения, усадка и деформационные состояния материала. Показано, что перенос энергии и влаги во влажной и сухой фазах образует систему прямых и обратных связей, а изменение физико-химических свойств материала влияет одновременно на интенсивность переноса, локализацию зоны испарения и развитие структурно-механических деформаций. Уточнена последовательность переходов от вязкопластического состояния к пластическому, упругопластическому и упругому, а также связь этих переходов с образованием микро-, локальных и сквозных трещин. Разработанная схема может использоваться как концептуальная основа для постановки математических моделей, выбора существенных параметров эксперимента и проектирования процессов сушки плодов и овощей с учетом сохранения структуры и качества продукта.

Abstract

The aim of the study is to systematize the relationships among physicochemical, interfacial, energy-transfer and mass-transfer phenomena that determine thermal processing and drying of fruit and vegetable materials, and to represent them as a third-level hierarchical structural scheme of system-semantic analysis. The methodology combines multilevel system-semantic analysis, elements of topology and directed graph theory, and cause-and-effect decomposition of heat and mass transfer. Temperature, moisture-content and pressure fields, changes in surface tension, the position of the evaporation zone, shrinkage and deformation states were considered as key variables. The analysis shows that energy and moisture transfer in the wet and dry phases form a network of direct and feedback relationships, while changes in physicochemical properties simultaneously affect transfer intensity, evaporation-zone localization and structural-mechanical deformation. The sequence of transitions from viscoplastic to plastic, elastoplastic and elastic behavior was clarified, together with its relationship to the formation of microcracks, local cracks and through-cracks. The proposed structural scheme can serve as a conceptual basis for selecting significant model variables, formulating mathematical models and planning experimental studies and drying equipment aimed at preserving product structure and quality.

Ключевые слова: системно-смысловой анализ, сушка, плоды и овощи, тепломассоперенос, структурная схема, деформация, зона испарения.

Keywords: system-semantic analysis, drying, fruits and vegetables, heat and mass transfer, structural scheme, deformation, evaporation zone.

Введение

Сушка плодов и овощей представляет собой не отдельный акт удаления влаги, а совокупность взаимосвязанных теплофизических, массообменных, структурно-механических и фазовых явлений. Современные исследования рассматривают сушку растительного сырья как нестационарный сопряженный процесс переноса теплоты и влаги, в котором изменение температуры, влажности, давления и структуры материала взаимно

влияет на скорость обезвоживания и качество готового продукта [4, 7, 10]. Для пористых пищевых материалов особенно значимы внутренний перенос влаги, испарение на поверхности и внутри тела, деформация, усадка и формирование поровой структуры [3, 11].

При усложнении способов энергоподвода — использовании инфракрасного, микроволнового, ультразвукового, электрополевого и комбинированного воздействия — количество взаимодействующих факторов возрастает. В таких условиях локальное рассмотрение отдельных кинетических зависимостей не всегда позволяет установить причинно-следственные связи между изменением состояния материала и переносными процессами. Системный подход дает возможность представить объект как иерархию взаимосвязанных элементов и выделить наиболее существенные связи для последующего моделирования [1, 5].

В ранее выполненной работе авторов по экспериментальному исследованию сушки плодов и овощей с применением электрофизических методов были сформулированы предпосылки для перехода от описания отдельных параметров процесса к их системной интерпретации [2]. В настоящем исследовании внимание сосредоточено на третьем уровне иерархии, где совместно рассматриваются перенос энергии и массы, поля состояния, положение зоны испарения, усадка и деформационные превращения материала.

Цель исследования — разработать структурное представление физико-химических и межфазных энерго- и массообменных процессов при тепловой обработке плодоовощного сырья и определить причинно-следственные связи между переносом энергии и массы, изменением полей состояния, усадкой и деформацией материала. Для достижения цели решались задачи: выделение ключевых элементов третьего уровня иерархии; установление направлений прямых и обратных связей между ними; систематизация деформационных состояний при сушке; формирование предпосылок для дальнейшей математической формализации процесса.

Материалы и методы

Объектом системного рассмотрения служили процессы тепловой обработки и сушки влажных плодоовощных материалов как многофазных коллоидно-пористых систем. Исходное представление включает влажную фазу и сухую матрицу, между которыми при подводе энергии происходят перенос теплоты, миграция влаги, испарение и изменение структурно-механических свойств. Методическая схема исследования основана на системно-смысловом анализе, при котором сложный процесс декомпозируется на функциональные элементы и связи, а затем объединяется в ориентированный граф [1, 5].

В качестве узлов структурной схемы использованы: перенос энергии (ПЭ), перенос массы (ПМ), поля температуры T, влагосодержания U и давления P, поверхностное напряжение σ, зона испарения (ЗИ), усадка, деформация, а также последовательные структурно-механические состояния материала. Направленные дуги отражают причинно-следственное воздействие одного элемента на другой. Обратные связи используются для описания влияния изменения свойств фаз и деформации на интенсивность переноса энергии и массы.

При интерпретации схемы учитывались современные представления о сопряженном тепломассопереносе в пищевых и растительных материалах. Согласно литературным данным, процесс сушки сопровождается сменой доминирующих механизмов влагопереноса, а усадка влияет на эффективные коэффициенты переноса и на геометрию области расчета [3, 8, 11]. Для оценки актуальности выбранных связей выполнено сопоставление структурной схемы с современными обзорами по сушке плодов и овощей, комбинированным способам энергоподвода и оценке качества сушеной продукции [3, 4, 6, 8–12].

Метод исследования носит концептуально-аналитический характер: количественная идентификация коэффициентов модели и экспериментальная верификация отдельных дуг графа не входили в задачи данной работы. Полученная схема рассматривается как основа для последующего выбора измеряемых переменных, построения уравнений состояния и переноса и постановки факторных экспериментов.

Результаты и обсуждение

Влажный плодоовощной материал целесообразно рассматривать как систему, в которой влажная и сухая фазы изменяются одновременно. При сушке протекают два базовых процесса: перенос энергии, обеспечивающий нагрев материала и фазовое превращение влаги, и перенос массы, включающий перемещение влаги внутри материала и ее удаление во внешнюю среду. Основными движущими факторами выступают пространственно-временные неоднородности температуры T, влагосодержания U и давления P. Несоответствие между скоростью испарения влаги с поверхности и скоростью ее подвода из внутренних слоев приводит к перемещению и углублению зоны испарения.

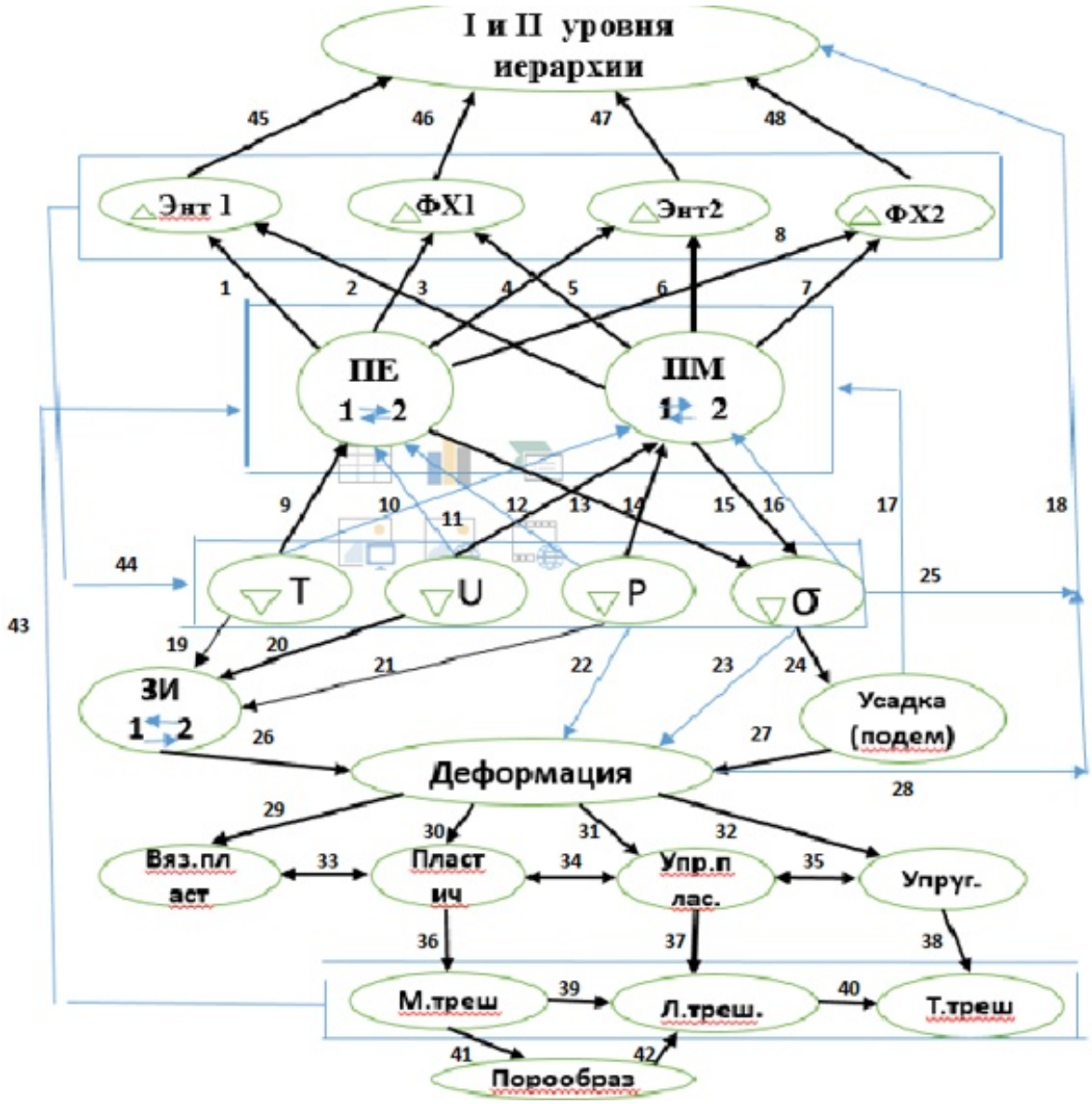

Рисунок 1. Структурная схема физико-химических эффектов третьего уровня иерархии системно-смыслового анализа плодов и овощей

Как видно из рис. 1, каждый вид неравномерности прежде всего вызывает перенос соответствующей субстанции и одновременно оказывает перекрестное влияние на другие переносные процессы. Температурный градиент определяет теплоперенос, градиент влагосодержания связан с перемещением влаги, а изменение давления может усиливать перенос паровой фазы. В реальном пищевом материале эти механизмы протекают совместно, поэтому их раздельное математическое описание должно дополняться условиями сопряжения. Современные модели сушки пористых материалов также исходят из взаимосвязанности полей температуры и влаги и необходимости учитывать изменение геометрии при усадке [3, 11].

Потоки энергии и массы изменяют энтальпию и физико-химические характеристики влажной и сухой фаз. К таким характеристикам относятся плотность, вязкость, теплоемкость, пористость, температуропроводность и теплопроводность. В структурной схеме их изменение связано обратными дугами с переносом энергии и массы. Это принципиально

важно, поскольку свойства материала в ходе сушки не являются постоянными: уменьшение влагосодержания изменяет поровую структуру и сопротивление внутреннему массопереносу, а температурное воздействие влияет на состояние клеточных и полимерных компонентов.

Перенос энергии и массы нарушает локальное равновесие на межфазной границе и сопровождается изменением поверхностного напряжения. Возникающие нормальные и касательные напряжения способны изменять форму и внутреннюю структуру материала. В зависимости от режима сушки это проявляется как усадка или более сложная деформация. Усадка, в свою очередь, изменяет длину диффузионного пути, площадь поверхности и пористость, формируя обратное воздействие на переносные процессы. Роль усадки в механизме тепломассопереноса подтверждается моделями, в которых изменение размеров образца непосредственно учитывается в уравнениях переноса [11].

Зона испарения может располагаться на поверхности либо перемещаться внутрь материала. На начальном этапе при достаточном подводе влаги из внутренних слоев значительная часть испарения происходит вблизи поверхности. По мере снижения влагосодержания внутреннее сопротивление возрастает, и зона активного фазового превращения смещается в глубину. В структурной схеме это смещение связано с последующим развитием деформации и усадки. Такое представление согласуется с современным пониманием сушки как перехода от внешне контролируемого удаления влаги к режиму, в котором существенную роль играет внутренний массоперенос [7, 12].

Отдельный блок схемы отражает последовательность структурно-механических состояний. На ранних стадиях материал способен проявлять вязкопластическое поведение; затем возрастает доля пластических и упругопластических деформаций, а на поздних стадиях при существенном снижении влажности возрастает роль упругой составляющей. Микротрещины связываются преимущественно с пластическими деформациями, более крупные локальные трещины — с упругопластическим состоянием, а развитие сквозных трещин означает нарушение целостности структуры. Следовательно, задача оптимизации сушки должна включать не только сокращение времени обезвоживания, но и ограничение градиентов температуры и влагосодержания, вызывающих критические механические напряжения.

Современные способы интенсификации сушки — ультразвуковая, инфракрасная, микроволновая и электродинамическая обработка — направлены прежде всего на изменение условий подвода энергии или снижение сопротивления влагопереносу [6, 8, 12, 9]. Однако усиление энергоподвода может создавать локальную неравномерность температуры и повышать риск структурных повреждений. Поэтому предложенная структурная схема полезна как средство предварительного анализа: при включении нового физического воздействия можно определить, на какие узлы третьего уровня оно действует непосредственно и какие вторичные эффекты возникают через цепочки связей.

Практическая ценность системно-смыслового представления заключается в возможности перейти от качественной схемы к математической модели. Для этого узлам графа могут быть сопоставлены измеряемые переменные, а дугам — функциональные зависимости или коэффициенты чувствительности. Поля T, U и P могут быть описаны дифференциальными уравнениями переноса, усадка — функцией локального

влагосодержания и температуры, а переходы между деформационными состояниями — реологическими соотношениями. Такой порядок позволяет последовательно усложнять модель, сохраняя ее физическую интерпретируемость.

Заключение

Разработано структурное представление третьего уровня иерархии системно-смыслового анализа процессов тепловой обработки и сушки плодоовощного сырья. В единой схеме объединены перенос энергии и массы, поля температуры, влагосодержания и давления, изменение поверхностного напряжения, положение зоны испарения, усадка и последовательность деформационных состояний материала.

Установлено, что ключевой особенностью рассматриваемой системы является наличие прямых и обратных связей: перенос энергии и массы изменяет свойства фаз и структуру материала, а структурные изменения, в свою очередь, влияют на условия дальнейшего тепломассопереноса. Углубление зоны испарения и рост внутренних градиентов связаны с развитием усадки и деформации; переход от вязкопластического к пластическому, упругопластическому и упругому состоянию сопровождается повышением риска образования микро-, локальных и сквозных трещин.

Предложенная схема может использоваться для конкретизации задач исследования, выбора контролируемых параметров и факторов, разработки сопряженных математических моделей и обоснования режимов сушки, ориентированных на минимизацию усадки и разрушения структуры при сохранении требуемой интенсивности обезвоживания. Следующим этапом целесообразно считать количественную идентификацию наиболее значимых связей и экспериментальную проверку модели для конкретных видов плодов и овощей.

Список литературы

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. – М.: Наука, 1976. – 500 с.
2. Курбанова М.Ж. Экспериментальное исследование процесса сушки плодов и овощей с применением электрофизических методов: монография. – Ташкент: Ташкентский государственный аграрный университет, 2025. – 140 с.
3. An J., Xie H., Yan J., Wei H., Wu Y., Liao X. A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology // Energy Reports. – 2024. – Т. 12. – P. 5482–5506. – DOI: 10.1016/j.egyr.2024.11.037.
4. Bhattacharjee S., Mohanty P., Sahu J.K., Sahu J.N. A critical review on drying of food materials: Recent progress and key challenges // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2024. – Т. 158. – Art. 107863. – DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107863.
5. Harary F. Graph Theory. – Reading, MA: Addison-Wesley. – 1969. – 274 P.
6. Iranshahi K., Onwude D.I., Martynenko A., Defraeye T. Dehydration mechanisms in electrohydrodynamic drying of plant-based foods // Food and Bioproducts Processing. – 2022. – Т. 131. – P. 202–216. – DOI: 10.1016/j.fbp.2021.11.009.

7. Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H. Intermittent drying of food products: A critical review // Journal of Food Engineering. – 2014. – T. 121. – P. 48–57. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014.
8. Mohammed A.N., Chauhan O.P., Semwal A.D. Emerging technologies for fruits and vegetables dehydration // Food and Humanity. – 2024. – T. 2. – Art. 100303. – DOI: 10.1016/j.foohum.2024.100303.
9. Onwude D.I., Iranshahi K., Rubinetti D., Schudel S., Schemminger J., Martynenko A., Defraeye T. How much do process parameters affect the residual quality attributes of dried fruits and vegetables for convective drying? // Food and Bioproducts Processing. – 2022. – T. 131. – P. 176–190. – DOI: 10.1016/j.fbp.2021.11.005.
10. Reis F.R., Marques C. de Moraes A.C.S., Masson M.L. Trends in quality assessment and drying methods used for fruits and vegetables // Food Control. – 2022. – T. 142. – Art. 109254. – DOI: 10.1016/j.foodcont.2022.109254.
11. Tuly S.S., Joardder M.U.H., Welsh Z.G., Karim A. Mathematical modelling of heat and mass transfer during jackfruit drying considering shrinkage // Energies. – 2023. – T. 16, № 11. – Art. 4461. – DOI: 10.3390/en16114461.
12. Xu B., Tiliwa E.S., Yan W., Azam S.M.R., Wei B., Zhou C., Ma H., Bhandari B. Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review // Food Research International. – 2022. – T. 152. – Art. 110744. – DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110744.

References

1. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. Sistemnyi analiz protsessov khimicheskoi tekhnologii. Osnovy strategii [System analysis of chemical engineering processes. Strategy fundamentals]. Moscow: Nauka, 1976. 500 P. (In Russ.).
2. Kurbanova M.Zh. Eksperimentalnoe issledovanie protsessa sushki plodov i ovoshchei s primeneniem elektrofizicheskikh metodov [Experimental study of fruit and vegetable drying using electrophysical methods]. Tashkent: Tashkent State Agrarian University, 2025. 140 P. (In Russ.).
3. An J., Xie H., Yan J., Wei H., Wu Y., Liao X. A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology. Energy Reports, 2024, vol. 12, P. 5482–5506. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.11.037.
4. Bhattacharjee S., Mohanty P., Sahu J.K., Sahu J.N. A critical review on drying of food materials: Recent progress and key challenges. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, vol. 158, 107863. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107863.
5. Harary F. Graph Theory. Reading, MA: Addison-Wesley. – 1969. – 274 P.
6. Iranshahi K., Onwude D.I., Martynenko A., Defraeye T. Dehydration mechanisms in electrohydrodynamic drying of plant-based foods. Food and Bioproducts Processing, 2022, vol. 131, P. 202–216. DOI: 10.1016/j.fbp.2021.11.009.

7. Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H. Intermittent drying of food products: A critical review // Journal of Food Engineering. – 2014. – P. 48–57. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng. 2013.08.014.
8. Mohammed A.N., Chauhan O.P., Semwal A.D. Emerging technologies for fruits and vegetables dehydration. Food and Humanity, 2024, vol. 2, 100303. DOI: 10.1016/j.foohum.2024.100303.
9. Onwude D.I., Iranshahi K., Rubinetti D., Schudel S., Schemminger J., Martynenko A., Defraeye T. How much do process parameters affect the residual quality attributes of dried fruits and vegetables for convective drying? Food and Bioproducts Processing, 2022, vol. 131, P. 176–190. DOI: 10.1016/j.fbp.2021.11.005.
10. Reis F.R., Marques C., de Moraes A.C.S., Masson M.L. Trends in quality assessment and drying methods used for fruits and vegetables. Food Control, 2022, vol. 142, 109254. DOI: 10.1016/ j.foodcont.2022.109254.
11. Tuly S.S., Joardder M.U.H., Welsh Z.G., Karim A. Mathematical modelling of heat and mass transfer during jackfruit drying considering shrinkage. Energies, 2023, vol. 16, no. 11, 4461. DOI: 10.3390/en16114461.
12. Xu B., Tiliwa E.S., Yan W., Azam S.M.R., Wei B., Zhou C., Ma H., Bhandari B. Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review. Food Research International, 2022, vol. 152, 110744. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110744.