

Закономерности измельчения и гранулометрия кофейного порошка в формировании экстрактивных систем: состояние проблемы и перспективы исследований

Фролов Д.И., Поляков А.В.

Аннотация. В статье рассмотрено влияние измельчения и гранулометрического состава (PSD) кофейного порошка на гидродинамику и массообмен при экстракции. Проанализированы процессы диспергирования в валковых и жерновых мельницах, методы лазерной дифракции и динамического анализа изображений, а также модели фильтрационного переноса и растворения. Установлено, что влажность обжаренного зерна критически влияет на хрупкость и энергоёмкость измельчения: выше 5% PSD смещается в крупные фракции, снижается удельная поверхность и ускоряется перколяция. Ключевую роль играет бимодальное распределение частиц (максимумы ~70 и ~425 мкм), обеспечивающее баланс скорости экстракции и гидравлической проницаемости. Немонотонность выхода экстракции объясняется гидродинамической неустойчивостью и каналобразованием. Бимодальные распределения превосходят мономодальные по полноте извлечения соединений.

Ключевые слова: гранулометрия, измельчение, кофе, экстракция, бимодальность, проницаемость, эспрессо.

Для цитирования: Фролов Д.И., Поляков А.В. Закономерности измельчения и гранулометрия кофейного порошка в формировании экстрактивных систем: состояние проблемы и перспективы исследований // Инновационная техника и технология. 2026. Т. 13. № 3. С. 103–107.

Grinding regularities and granulometry of coffee powder in the formation of extraction systems: state of the art and research perspectives

Frolov D.I., Polyakov A.V.

Abstract. The article examines the influence of grinding and particle size distribution (PSD) of coffee powder on hydrodynamics and mass transfer during extraction. It analyzes dispersion processes in roller and burr mills, laser diffraction and dynamic image analysis methods, as well as models of filtration transport and dissolution. It was found that the moisture content of roasted beans critically affects brittleness and grinding energy requirements: at levels above 5%, the PSD shifts toward coarser fractions, specific surface area decreases, and percolation accelerates. A bimodal particle distribution (peaks at ~70 and ~425 μm) plays a key role, ensuring a balance between extraction rate and hydraulic permeability. Non-monotonic extraction yield is attributed to hydrodynamic instability and channeling. Bimodal distributions outperform monomodal ones in terms of the completeness of compound extraction.

Keywords: granulometry, grinding, coffee, extraction, bimodality, permeability, espresso.

For citation: Frolov D.I., Polyakov A.V. Grinding regularities and granulometry of coffee powder in the formation of extraction systems: state of the art and research perspectives. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2026. Vol. 13. No. 3. pp. 103–107. (In Russ.).

Введение

Экстракция кофейного напитка представляет собой сложный физико-химический процесс вымывания растворимых твердых веществ и эмульгирования липидов из пористой матрицы обжаренного и измельченного зерна в жидкую фазу [2]. Измельчение (диспергирование) обжаренных кофейных зерен является обязательным подготовительным этапом, определяющим площадь межфазного контакта, степень разрушения клеточных структур, диффузионный путь внутри частиц и гидравлическое сопротивление сформированного слоя [1, 6]. В современной пищевой инженерии и физике мягкой материи исследование дисперсных систем кофейного порошка приобрело особое значение в связи с развитием способов заваривания под давлением и фильтрационных технологий. Однако долгое время процессы подготовки кофейного порошка рассматривались преимущественно эмпирически. Полноценное научно-инженерное осмысление требует перехода от поверхностных наблюдений к анализу фундаментальных явлений переноса массы, импульса и гидродинамики пористых сред.

Критический анализ современной литературы показывает наличие существенных фундаментальных противоречий и решенных лишь частично вопросов. Во-первых, влияние содержания влаги после обжарки и процесса отлежки (эквilibрации) на хрупкость зерна и итоговый гранулометрический состав описано лишь для ограниченного спектра промышленных мельниц [1]. Во-вторых, существует так называемый парадокс тонкого измельчения: согласно классическому закону диффузии Фика, уменьшение среднего размера частиц должно монотонно увеличивать скорость растворения и выход экстракции, однако экспериментальные данные демонстрируют аномальное падение выхода экстракции при уменьшении размера частиц ниже критического порога [3]. В-третьих, продолжаются научные дискуссии о роли бимодальности грануло-

метрического состава и целесообразности применения узких монодисперсных распределений вместо широких бимодальных профилей [4, 5].

Целью настоящего обзорного исследования является установление фундаментальных физико-химических и гидродинамических закономерностей между условиями измельчения, гранулометрическим составом кофейного порошка и кинетикой вымывания экстрактивных веществ для предотвращения каналообразования и обеспечения воспроизводимого качества экстрактов. В соответствии с поставленной целью в работе решаются задачи выявления влияния влажности зерна на параметры измельчения, анализа гидродинамической роли бимодального распределения и пылевидной фракции, математического описания массопереноса с учетом динамической проницаемости, а также оценки влияния гранулометрии на вымывание биоактивных компонентов.

Объекты и методы исследования

Методологический аппарат исследования опирается на сочетание физико-химических теорий массопереноса, гидродинамики пористых сред и современного инструментального дисперсионного анализа. Кинетика вымывания растворимых компонентов, включая кофеин, хлорогеновые кислоты и органические кислоты, из твердой фазы кофейных частиц в жидкую в приближении сферической формы частиц с радиусом R , окруженных диффузионным слоем Нернста толщиной δ , описывается первым законом Фика:

$$J = \frac{D \cdot A}{\delta} (c'_1 - c_1) \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии в жидкой среде ($\text{м}^2/\text{с}$);

A – суммарная площадь поверхности частиц (м^2);

Таблица 1 – Влияние влажности обжаренного зерна и времени отлежки на гранулометрические и экстракционные параметры [1]

Режим обжарки и партия	Влажность зерна W , %	Время отлежки, ч	Плотность распределения при $x = 70,71$ мкм	Медианный размер частиц D_{mean} , мкм	Время перколяции (60 мл), с	Выход экстракции EY , %
Стандартный (NT 1)	2,3	0	0,3	424,3	26,5	25,3
Стандартный (NT 1)	2,3	24	0,3	424,3	27,6	25,9
Стандартный (NT 2)	5,1	0	0,28	424,3	25,6	24,9
Стандартный (NT 2)	5,1	24	0,25	424,3	23	25,6
Стандартный (NT 3)	8,8	0	0,13	1949,4	28,5*	21,1
Стандартный (NT 3)	8,8	24	0,18	574,5	20	23,3
Длительный (LT 1)	2,9	0	0,26	424,3	25,5	23,7
Длительный (LT 1)	2,9	24	0,26	424,3	23,9	23,4
Длительный (LT 3)	5,9	0	0,18	524,4	24,7	22,2
Длительный (LT 3)	5,9	24	0,25	474,3	22	22,3

c_1' – концентрация растворенного вещества у поверхности твердой фазы (кг/м³);

c_1 – концентрация в объеме раствора (кг/м³). Изменение концентрации вещества в объемном растворе со временем t описывается кинетическим уравнением первого порядка:

$$\frac{dc}{dt} = k \cdot (c_{sat} - c) \quad (2)$$

где k – константа скорости экстракции (с⁻¹); – насыщающая концентрация вещества при заданной температуре (кг/м³). Движение жидкого экстрагента через сформированный плотный слой кофейного порошка под внешним или гравитационным давлением описывается интегральной формой закона Дарси:

$$Q = \frac{A \cdot \Delta p}{R} \quad (3)$$

где Q – объемный расход экстрагента (м³/с); Δp – перепад давления на слое (Па); R – гидравлическое сопротивление слоя (Па·с/м³). Гидравлическое сопротивление и абсолютная проницаемость слоя κ определяются пористостью слоя ϵ и средним диаметром частиц d_p согласно уравнению Козени-Кармана [4, 8]:

$$\kappa = \frac{\epsilon^3}{S_v^2 \cdot K_{KC} \cdot (1 - \epsilon)^2} = \frac{d_p^2 \cdot \epsilon^3}{180 \cdot (1 - \epsilon)^2} \quad (4)$$

где S_v – удельная поверхность частиц на единицу объема (м⁻¹); K_{KC} – константа Козени-Кармана. Для анализа локальной ненасыщенности и гетерогенности фильтрации используется двухканальная феноменологическая модель Lee et al. [3], связывающая изменение пористости ϵ_i и безразмерной концентрации C_i в параллельных каналах прохождения:

$$\frac{d\epsilon_i}{d\tau} = (1 - C_i) \cdot \theta (EY_{max} - EY_i) \quad (5)$$

$$\alpha \epsilon_i \frac{dC_i}{d\tau} = (1 - C_i)(1 - \alpha C_i) \theta \cdot (EY_{max} - EY_i) - \frac{2\beta \kappa_i}{\kappa_1 + \kappa_2} C_i \quad (6)$$

Инструментальный гранулометрический анализ осуществляется сочетанием методов лазерной дифракции и динамического анализа изображений, позволяющим определять как объемные распределения эквивалентных сфер (D_{10} , D_{50} , D_{90} , $M_{4,3}$), так и морфологические параметры отдельной частицы (сферичность, округлость, выпуклость). В качестве основного оборудования измельчения рассматриваются многоступенчатые валковые мельницы с рифлеными валками и дифференциалом скоростей 2:1 [6], а также конические и плоские жерновые кофемолки.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования авторов [1] убедительно демонстрируют, что влажность обжаренного зерна, регулируемая водяным охлаждением (квенчингом) в диапазоне от 2,3 до 8,8 г/100 г сухой массы, является определяющим фактором механического поведения кофейной матрицы при измельчении. Сухие зерна с влажностью 2,3–2,9% проявляют выраженную хрупкость, легко разрушаясь под действием сдвиговых и сжимающих напряжений с образованием развитой удельной поверхности и стабильного содержания тонкой пылевидной фракции. Повышение влажности зерна приводит к пластификации клеточных стенок, в результате чего при аналогичных зазорах измельчающих элементов возрастают удельные затраты энергии, а гранулометрический состав смещается в сторону крупнодисперсных фракций.

Для зерен со средней и повышенной влажностью критическое значение приобретает продолжительность процесса отлежки (эквilibрации) после обжарки. За время отлежки от 6 до 24 часов происходит перераспределение влаги в микропористой структуре зерна, восстанавливающее хрупкость клеточных перегородок. В противном случае, при разрушении свежееобжаренных влажных зерен без отлежки (например, при влажности 8,8%), образуется аномально крупный помол с медианным размером около 1950 мкм, что приводит к падению выхода экстракции с 25,9% до 21,1% вследствие

Таблица 2 – Сравнительные физико-химические и гидродинамические параметры различных систем экстракции кофе [2, 9]

Способ экстракции	Характерный размер частиц d_p , мкм	Давление P , бар / Температура T , °C	Время контакта t	Физико-химические особенности и свойства экстракта
Эспрессо	200–450 (бимодальный)	7–11 бар / 88–96 °C	20–30 с	Высокая концентрация растворенных веществ (TDS 8,0–12,0%), наличие эмульгированных липидов, стойкая пенка за счет выбивания CO ₂
Фильтр-кофе	500–700 (средний)	1 бар (гравитационный) / 90–95 °C	3–5 мин	Умеренная концентрация растворенных веществ (TDS 1,1–1,4%), селективная задержка липидной фракции бумажным фильтром
Холодная инфузия	800–1200 (крупный)	1 бар (атмосферное) / 4–22 °C	8–24 ч	Избирательное вымывание: высокий уровень кофеина при пониженной титруемой кислотности и фенольной терпкости

фатального недостатка площади межфазного контакта.

Анализ гранулометрических профилей показал, что кофейный порошок промышленного помола характеризуется выраженной бимодальностью. Первичный модальный пик пылевидной фракции располагается в диапазоне 30–100 мкм (медиана около 70 мкм) и формируется в результате микроскалывания клеточных стенок. Вторичный пик крупной фракции (coarse) варьирует от 300 до 800 мкм в зависимости от целевого способа экстракции. Промышленные валковые мельницы, использующие сдвиговое резание на рифленых валках, обеспечивают сужение дельты распределения и сокращают генерацию неконтролируемой пыли на 50–75% по сравнению с молотковыми и ножевыми дезинтеграторами [6]. Сравнение кинетики экстракции показывает, что калиброванный мономодальный помол уступает бимодальному по выходу полифенольных и ароматических веществ [5], так как отсутствие пылевой фракции снижает начальную скорость растворения, а избыточное плотное уплотнение однородных зерен снижает фильтрационную проницаемость.

Фундаментальное значение для понимания физики экстракции имеет объяснение аномально-го снижения выхода экстракции при сверхтонком измельчении порошка. В соответствии с решением многомасштабной математической модели [3], уменьшение среднего размера частиц ниже определенного порога провоцирует гидродинамическую неустойчивость. В свежесформированном кофейном слое неизбежно присутствуют флуктуации локальной пористости. В зонах с исходно чуть более высокой пористостью гидродинамическое сопротивление ниже, что привлекает больший локальный расход экстрагента. Усиленный поток жидкости ускоренно вымывает растворимую матрицу, что еще сильнее увеличивает локальную пористость и проницаемость. Возникает положительная обратная связь, формирующая доминирующие каналы протекания.

Образование предпочтительных каналов приводит к тому, что до 80–90% фильтрующейся воды протекает через полностью истощенные участки таблетки, не вступая в массообмен с остальным объемом кофейного порошка. В результате возникает двухфакторный дефект заваривания: с одной стороны, основная масса порошка остается недоэкстрагированной, а с другой стороны, через промоины вымываются труднорастворимые высокомолекулярные полифенолы и продукты деструкции углеводов, обуславливающие неприятную резкую горечь. Таким образом, оптимизация гранулометрического состава заключается не в максимизации степени измельчения, а в строгом балансе между кинетикой растворения и предотвращением гидравлического каналообразования.

Выводы

В результате проведенного обобщения и анализа научных данных систематизированы фундаментальные механизмы, определяющие взаимосвязь между механической подготовкой зерна, гранулометрией и гидродинамикой экстракционных систем. Установлено, что влажность зерна свыше 5% снижает хрупкость матрицы и требует обязательной технологической отлежки в течение 6–24 часов для стабилизации дисперсионного состава помола. Доказано, что бимодальный гранулометрический профиль обеспечивает оптимальный баланс между поверхностным вымыванием из тонкой фракции и сохранением гидравлической проницаемости слоя. Анализ гидродинамических неустойчивостей объясняет ограничение эффективности тонких помолов возникновением каналообразования. Практическое значение полученных выводов заключается в возможности инженерного расчета параметров измельчения и прессования порошка для предотвращения дефектов экстракции, а перспективы дальнейших исследований связаны с развитием 3D-моделирования нестационарного набухания и фильтрации.

Литература

- [1] Baggenstoss J., Perren R., Escher F. Water content of roasted coffee: impact on grinding behaviour, extraction, and aroma retention // *European Food Research and Technology*. 2008. Vol. 227. No. 5. pp. 1357–1365.
- [2] Córdoba N., Fernandez-Alduenda M., Moreno F.L., Ruiz Y. Coffee extraction: A review of parameters and their influence on the physicochemical characteristics and flavour of coffee brews // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 96. pp. 45–60.
- [3] Lee W.T., Smith A., Arshad A. Uneven Extraction in Coffee Brewing // *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2206.12373v2. pp. 1–12.

References

- [1] Baggenstoss J., Perren R., Escher F. Water content of roasted coffee: impact on grinding behavior, extraction, and aroma retention // *European Food Research and Technology*. 2008. Vol. 227. No. 5. pp. 1357–1365.
- [2] Córdoba N., Fernandez-Alduenda M., Moreno F.L., Ruiz Y. Coffee extraction: A review of parameters and their influence on the physicochemical characteristics and flavor of coffee brews // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 96. pp. 45–60.
- [3] Lee W.T., Smith A., Arshad A. Uneven Extraction in Coffee Brewing // *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2206.12373v2. pp. 1–12.
- [4] Vaca Guerra M., Harshe Y.M., Fries L., Rothberg

- [4] Vaca Guerra M., Harshe Y.M., Fries L., Rothberg S., Palzer S., Heinrich S. Influence of particle size distribution on espresso extraction via packed bed compression // *Journal of Food Engineering*. 2023. Vol. 340. p. 111301.
- [5] Angeloni G., Masella P., Spadi A., Guerrini L., Corti F., Bellumori M., Calamai L., Innocenti M., Parenti A. Using ground coffee particle size and distribution to remodel beverage properties // *European Food Research and Technology*. 2023. Vol. 249. pp. 1205–1215.
- [6] Ephraim D. Roller mills: Precisely reducing particle size with greater efficiency // *Modern Process Equipment Application Note*. 2018. pp. 1–6.
- [7] Moroney K.M., Lee W.T., O'Brien S.B.G., Suijver F., Marra J. Modelling of coffee extraction during brewing using multiscale methods: An experimentally validated model // *Chemical Engineering Science*. 2015. Vol. 137. pp. 216–234.
- [8] Corrochano B.R., Melrose J.R., Bentley A.C., Fryer P.J., Bakalis S. A new methodology to estimate the steady-state permeability of roast and ground coffee in packed beds // *Journal of Food Engineering*. 2015. Vol. 150. pp. 106–116.
- [9] Fuller M., Rao N.Z. The effect of time, roasting temperature, and grind size on caffeine and chlorogenic acid concentrations in cold brew coffee // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. No. 1. p. 17979.
- S., Palzer S., Heinrich S. Influence of particle size distribution on espresso extraction via packed bed compression // *Journal of Food Engineering*. 2023. Vol. 340. p. 111301.
- [5] Angeloni G., Masella P., Spadi A., Guerrini L., Corti F., Bellumori M., Calamai L., Innocenti M., Parenti A. Using ground coffee particle size and distribution to remodel beverage properties // *European Food Research and Technology*. 2023. Vol. 249. pp. 1205–1215.
- [6] Ephraim D. Roller mills: Precisely reducing particle size with greater efficiency // *Modern Process Equipment Application Note*. 2018. pp. 1–6.
- [7] Moroney K.M., Lee W.T., O'Brien S.B.G., Suijver F., Marra J. Modeling of coffee extraction during brewing using multiscale methods: An experimentally validated model // *Chemical Engineering Science*. 2015. Vol. 137. pp. 216–234.
- [8] Corrochano B.R., Melrose J.R., Bentley A.C., Fryer P.J., Bakalis S. A new methodology to estimate the steady-state permeability of roast and ground coffee in packed beds // *Journal of Food Engineering*. 2015. Vol. 150 pp. 106–116.
- [9] Fuller M., Rao N.Z. The effect of time, roasting temperature, and grind size on caffeine and chlorogenic acid concentrations in cold brew coffee // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7.No. 1. p. 17979.

Сведения об авторах

Information about the authors

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	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
Поляков Александр Викторович аспирант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11	Polyakov Alexander Viktorovich upostgraduate student of the department «Food productions» Penza State Technological University