

ДИНАМИКА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КОЛЛОИДНЫХ АГРЕГАЦИЙ

А.А. ДОЛИНСКИЙ, А.А. АВРАМЕНКО, А.И. ТЫРИНОВ, Т.Л. ГРАБОВА

Введение

Применение теплотехнологий дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) перспективно для формирования биологических объектов, органонеорганических сорбентов, геле- и пастообразных систем и других коллоиднодисперсных систем, используемых в различных отраслях промышленности [1, 2]. Формирование коллоидных совокупностей, объединение в кластеры мицелл и наночастиц, играют большую роль в создании новых материалов, биологических объектов с уникальными теплофизическими, физико-химическими и функциональными свойствами. Важным аспектом, влияющим на свойства коллоидных систем, является их стабильность [3]. Сложность оценки экспериментальных образцов коллоидных структур заключается в необходимости применения дорогостоящего оборудования, основанных на оптических методах исследования (ультрамикроскопия, нефелометрия, турбидиметрия). В связи с этим, для изучения процессов структурообразования в коллоидных системах используют различные методы численного моделирования нано- (1...100 нм) и мезомасштабных (100 нм...100 мкм) процессов.

В работах [4—7] представлены результаты численного моделирования гетерогенных сред, на основе метода молекулярной динамики (molecular dynamics MD) и диссипативной динамики частиц (Dissipative Particle Dynamics DPD). В результате коллоидного взаимодействия происходит агрегация коллоидных частиц в различные структуры. Численное моделирование позволяет наблюдать образование сферических или стержневидных мицелл и их формирование в устойчивые структуры.

Основной проблемой при моделировании структурообразования коллоидов является разность пространственно-временных масштабов компонентов исследуемой среды. Например, в водном растворе коллоидных частиц размером 10 нанометров молекула воды имеет диаметр около 0,3 нанометра. Следовательно, разница в пространственных масштабах существенна. Весьма значительна она, также, и для временных масштабов благодаря разнице в скоростях движения частиц (молекулы воды и частицы коллоида).

Если рассматривать жидкую дисперсионную среду в коллоидных системах не как набор молекул, а как набор капель жидкости (мягких частиц), сравнимых по размерам с коллоидными частицами, то для моделирования поведения жидкости хорошо подходит метод DPD. Это позволяет уравнивать масштабы системы, сохранив достоверность получаемых результатов. Однако, недостатком метода динамики диссипативных частиц является отсутствие сил притяжения, наличие которых обуславливает самоорганизацию коллоидных структур. В отличие от метода DPD, применяемого для мезомасштабных

расчетов, метод молекулярной динамики основан на потенциалах Леннарда-Джонса и, поэтому, учитывает как силы отталкивания, так и притяжения между моделируемыми частицами. Метод MD обычно используется для моделирования явлений на атомарных масштабах. Однако в [8] представлены результаты моделирования мезо- и даже макромасштабных явлений на основе метода MD. Увеличение масштабов метода молекулярной динамики позволило получить хорошие результаты при расчете гранулированных потоков [9].

Исходя из этих результатов, более предпочтительно использовать метод MD с потенциалами Леннарда-Джонса для описания взаимодействия между коллоидными и жидкими частицами. Благодаря этому появляется возможность моделировать силы притяжения между жидкостью и коллоидными частицами. Учитывая, что оба взаимодействия частиц коллоид-коллоид и коллоид-жидкость представлены единой формулой, появляется возможность легко контролировать взаимодействия путем изменения глубины потенциальной ямы Леннарда-Джонса. Этот подход дает возможность рассчитывать процессы самоорганизации мицелл и их агрегаций.

Учитывая вышеизложенное, в данной работе рассмотрен двухуровневый метод моделирования коллоидных структур, совмещающий методы MD и DPD.

Математическая модель

Согласно методу MD молекула рассматривается как система частиц, которые взаимодействуют между собой по законам классической механики с заданным потенциалом взаимодействия. В механике состояние системы из N частиц в момент времени t однозначно определяется заданием векторов координат $x = \{x_i(t)\}$ и скоростей $\{v_i(t)\}$ частиц. Состояние системы в произвольный момент времени t описывается системой $3N$ уравнений Ньютона:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, 3N, \quad (1)$$

$$F_i(x) = -\frac{\partial U(x)}{\partial x_i}, \quad (2)$$

$U(x)$ - потенциальная энергия, зависящая от взаимного расположения всех атомов, имеет электромагнитную природу и обычно задается в виде суммы вкладов — валентного (ковалентного) и невалентного взаимодействия:

$$U = U_b + U_\theta + U_\varphi + U_\omega + U_{LJ} + U_{el}. \quad (3)$$

Слагаемые в (3) соответствуют следующим типам взаимодействий: U_b — химическим связям; U_θ — валентным углам; U_φ — торсионным углам; U_ω — плоским группам; U_{LJ} — ван-дер-ваальсовым взаимодействиям; U_{el} — электростатическим связям.

Валентное взаимодействие возникает между атомами одной молекулы при образовании химической связи и описывается потенциалом

$$U_b = \frac{1}{2} \sum_b K_b (r - b_0)^2 \quad (4)$$

где суммирование проводится по всем химическим связям.

Валентные углы формируют потенциал, описываемый выражением

$$U_\vartheta = \frac{1}{2} \sum_\vartheta K_\vartheta (\vartheta - \vartheta_0)^2. \quad (5)$$

Энергия торсионных взаимодействий (вращение атомных групп вокруг одинарных химических связей) и потенциалов, соответствующих плоским группам, задаются одинаковым видом потенциала

$$U_\varphi = \sum_\varphi K_\varphi [\cos(k\varphi - \chi) + 1]. \quad (6)$$

Под невалентными подразумевают ван-дер-ваальсовы и электростатические взаимодействия.

Ван-дер-ваальсовы взаимодействия атомов описываются потенциалами Леннарда—Джонса:

$$U_{LJ} = 4 \sum_{i,j} \epsilon \cdot \left(\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^6 \right). \quad (7)$$

Эти силы включают в себя: ориентационные силы, возникающие между молекулами, которые представляют собой постоянные диполи; силы индукционного притяжения, образующиеся между постоянными и наведенными диполями; дисперсионные силы, возникающие между мгновенными и наведенными диполями. Согласно теории ДЛФО (Дерягин, Ландау, Фервей и Овербек) именно ван-дер-ваальсовы силы являются основной причиной коллоидного структурообразования и устойчивости образованных агрегатов.

Электростатические взаимодействия задаются кулоновским потенциалом

$$U_{el} = \sum_{i,j} \frac{q_i q_j}{4\epsilon_0 r_{ij}} \quad (8)$$

Парциальные заряды на атомах не кратные заряду электрона — возникают из-за того, что атомы одних элементов стремятся притянуть к себе электронную пару ковалентной связи сильнее, чем атомы других элементов, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость среды.

Для моделирования поведения частиц жидкости предпочтительнее использовать метод DPD. Данный метод учитывает 3 типа сил взаимодействия: консервативные F_C , диссипативные F_D и стохастические F_R :

$$F_C = \pi\omega(r_{ij})\mathbf{e}_{ij}, F_D = \gamma m\omega(r_{ij})(\xi_{ij} \cdot \mathbf{e}_{ij})\mathbf{e}_{ij}, F_R = \frac{\delta\theta_{ij}}{\sqrt{\Delta t}}\omega(r_{ij})\mathbf{e}_{ij}, \quad (9)$$

где выражения для диссипативных и стохастических сил связаны через флуктуационно — диссипационную теорему.

Как отмечалось выше, для расчета взаимодействий частиц коллоид-коллоид, коллоид-жидкость и жидкость-жидкость необходимо использовать комбинацию методов MD и DPD. Следовательно, для описания коллоидных взаимодействий пары частиц удобно использовать двухуровневую математическую модель. В этой модели силы взаимодействия между частицами жидкость-жидкость рассчитываются с помощью метода DPD (10), так как этот метод наиболее реально описывает поведение жидкой среды растворителя. Для расчета взаимодействий между частицами коллоид-коллоид и коллоид-жидкость необходимо учитывать силы притяжения, так как они отвечают за процессы структурообразования. Поэтому для их расчета наиболее подходит метод MD (3). Так как главную роль в коллоидных взаимодействиях играют именно силы Ван-дер-Ваальса, то двухуровневая модель может быть представлена в следующем виде [5]

$$F_{ij}^n = \begin{cases} \pi_{ij}\omega_1(r_{ij}^n) - \gamma_{ij}m_i\omega_2(r_{ij}^n)(\mathbf{v}_{ij}^n \cdot \mathbf{e}_{ij}^n) + \frac{\delta\theta_{ij}}{\sqrt{\Delta t}}\omega_1(r_{ij}^n), & \text{если } i \text{ и } j \text{ растворитель} \\ \frac{24\epsilon_{ij}}{r_{ij}^n} \left[\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}^n} \right)^6 - 2 \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}^n} \right)^{12} \right], & \text{если } i \text{ и } j \text{ коллоид} \end{cases} \quad (10)$$

и $F_{ij}^n = 0$ для $r_{ij} > r_c$, где

$$\mathbf{v}_{ij}^n = \mathbf{v}_i^n - \mathbf{v}_j^n, \omega_1(r_{ij}^n) = \frac{3}{\pi r_c^2 n} \left(1 - \frac{r_{ij}^n}{r_c} \right), \omega_2(r_{ij}^n) = \frac{6}{\pi r_c^2 n} \left(1 - \frac{r_{ij}^n}{r_c} \right)^2, \quad (11)$$

$$\mathbf{e}_{ij}^n = \frac{\mathbf{r}_i^n - \mathbf{r}_j^n}{r_{ij}^n}, r_{ij}^n = \sqrt{(\mathbf{r}_i^n - \mathbf{r}_j^n)^2}$$

где вторая формула в (10) получена из (7).

Особенности реализации двухуровневой модели

Так как реальные размеры системы и временные шаги очень малы, моделирование производится в безразмерной форме. Обезразмеривание исходных данных производим по следующим масштабам: в качестве линейного масштаба принимаем радиус отсечения частицы коллоида; как единицу массы принимаем массу частицы коллоида, а в качестве масштаба времени принимаем время прохождения частицей коллоида расстояния, равного ее радиусу отсечения. Для масштабирования взаимодействия как коллоидных частиц между собой, так и с каплями жидкости значения энергий обезразмериваем по значению потенциала Леннарда-Джонса, для которого максимальное значение его сил притяжения равна абсолютному значению консервативной силы при DPD-взаимодействии. Таким образом, параметры взаимодействия частиц коллоид-коллоид и коллоид-жидкость будут иметь одинаковые значения. Значение масштабного фактора консервативных сил, отвечающего за сжимаемость жидкости, необходимо выбрать таким, чтобы система жидких частиц вела себя как жидкость в мезомасштабном диапазоне. В данном случае величина его выбрана такой, чтобы рассматриваемая жидкость имела сжимаемость воды. Плотность частиц выбираем такой, что количество частиц в радиусе отсечки примерно равно 20 [10].

Интегрирование системы уравнений (10) производилось комплексным способом [11]: метод "leap-frog" использовался для расчета положений частиц, а метод Adams-Bashforth для определения их скоростей. В алгоритме была предусмотрена процедура пересчета скоростей частиц каждые 10 временных шагов для термостатирования системы. При реализации метода предполагается, что в исходный момент времени частицы коллоида равномерно распределены по расчетной области.

Результаты моделирования

На основе описанной выше двухуровневой математической модели были проведены численные исследования динамики коллоидной системы. Количественная концентрация коллоидных частиц составляла 20%. Расчеты производились на прямоугольной решетке с периодическими граничными условиями (т.е. если частица покидает расчетную область через одну из границ, то она возвращается обратно через противоположную границу). Было промоделировано несколько вариантов, отличающихся значениями потенциалов взаимодействия коллоидных частиц между собой и с частицами жидкости. Расчеты производились до момента энергетического уравнивания системы, т.е. до момента, когда свободная энергия системы достигала минимального значения.

На рис. 1 (см. вклейку) показана конфигурация частиц после завершения расчета при отношении потенциалов взаимодействия $\epsilon_{c-c}/\epsilon_{c-s} = 1,1/0,9$. Как видно из рисунка при этих значениях потенциалов происходит формирование преимущественно "шаровидных" мицелл. Это обусловлено тем, что при значениях потенциалов взаимодействия частиц ϵ_{c-c} (коллоид-коллоид) превышающих единицу происходит взаимное отталкивание частиц. В то же время, если значения потенциалов взаимодействия частиц ϵ_{c-s} (коллоид-

растворитель) меньше единицы, то происходит их взаимное притяжение (гидрофильность частиц коллоида). Таким образом, образуются "шаровидные" мицеллы, представляющие собой одиночные гидрофильные коллоидные частицы (оранжевые), окруженные частицами жидкости (бирюзовые).

Далее были исследованы инверсные варианты, когда отношение потенциалов взаимодействия $\epsilon_{c-c}/\epsilon_{c-s}$ было меньше единицы. В этом случае превалируют силы притяжения между частицами коллоида, а сами частицы коллоида являются гидрофобными.

На рис. 2 (см. вклейку) показана пространственная конфигурация частиц исследуемой системы для значений потенциалов $\epsilon_{c-c}/\epsilon_{c-s} = 0,9/1,3$. При этом образуются "палочкообразные" мицеллы, состоящие из цепочек коллоидных частиц (оранжевые), окруженных частицами жидкости (бирюзовые). Такие структуры образуются из-за преобладания сил притяжения между несмачиваемыми частицами.

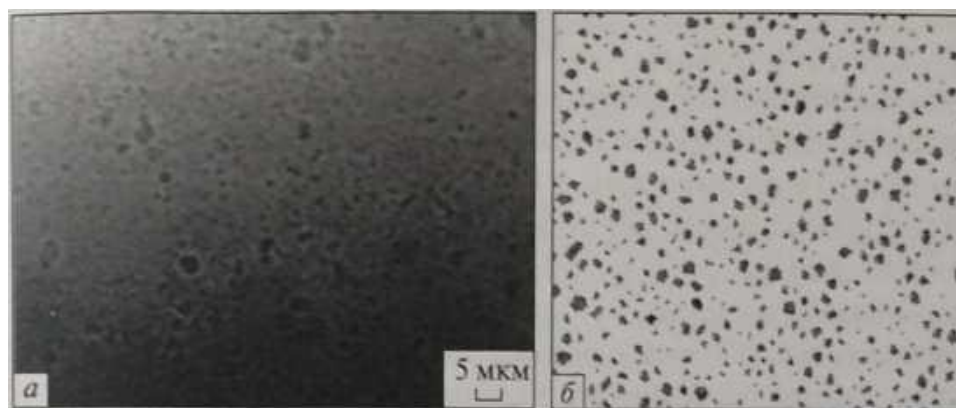


Рис. 5. Глобулярные структуры в системе "аэросил А-175 — вода": а — фото структуры (увеличение в 640 раз), б — расчетная конфигурация частиц

При дальнейшем увеличении сил притяжения между коллоидными частицами и одновременном росте их гидрофобности (потенциалы взаимодействия $\epsilon_{c-c}/\epsilon_{c-s} = 0,8/1,4$) на промежуточном этапе образуются "червеобразные" мицеллы, которые с течением времени (в равновесном состоянии) трансформируются в глобулярные структуры. Эти конфигурации моделируемых частиц показаны на рисунках 3 и 4 (см. вклейку) соответственно.

Для верификации предложенного метода было проведено сравнение результатов численных расчетов на основе двухуровневой модели коллоидных взаимодействий с экспериментально полученной структурой коллоидной системы. В качестве модельных коллоидных частиц взяты гидрофильный непористый диоксид кремния — аэросил А-175 с развитой удельной поверхностью ($175 \text{ м}^2/\text{г}$), с частицами сферической формы размером 10...40 нм. В качестве модельной жидкости — вода. Выбор такой модельной системы продиктован чрезвычайно широким практическим использованием: сорбенты, мягкие лекарственные формы, гели, лакокрасочные среды и другие структурированные системы.

Исследуемая система получена при однократном прохождении через дисково-цилиндрический аппарат АР-3000, в котором реализуется принцип ДИВЭ [2]. Частота генерируемых пульсаций в аппарате АР-3000 с 4-мя статорно-роторными парами достигает 3,5 кГц, скорость сдвига — до $200 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, средняя окружная скорость — 17 м/с.

Микроструктура модельной системы (рис.5, а), которая после обработки находилась в статических условиях до окончания процесса структурообразования, исследована оптическим методом на микроскопе Zeisse Axio Imager Z1. На рис.5, б представлена конфигурация частиц, полученная в результате численного моделирования. Видно, что экспериментальная и расчетная структуры, содержащие хорошо различимые глобулярные структуры коллоидных частиц, качественно довольно хорошо коррелируют. Такая корреляция позволяет сделать вывод о работоспособности предложенной модели для анализа процессов коллоидного структурообразования.

Выводы

Форма коллоидной структуры и её гидрофобный или гидрофильный характер зависят от отношения параметров взаимодействия $\epsilon_{c-c}/\epsilon_{c-s}$ коллоидных частиц (С) и растворителя (S).

В случае преобладания сил отталкивания между гидрофильными коллоидными частицами ($\epsilon_{c-c} > 1$; $\epsilon_{c-s} < 1$) в результирующей структуре доминируют "шарообразные" мицеллы.

"Палочкообразные" мицеллы, состоящие из линейно расположенных коллоидных частиц, окруженных частицам жидкости, формируются, когда гидрофобные частицы коллоида притягиваются между собой ($\epsilon_{c-c} < 1$; $\epsilon_{c-s} > 1$). При дальнейшем увеличении сил притяжения происходит образование "червеобразных" структур, а в дальнейшем — глобулярных.

Двухуровневый метод достаточно хорошо описывает процессы коллоидного структурообразования, что следует из приведенного сравнения экспериментальных и расчетных результатов.

Предложенный метод численного исследования актуален для прогнозирования и оценки свойств функциональных коллоидных систем.

F — силы, действующие на частицу	ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость среды
m — масса частицы	σ_{ij} — расстояние между частицами
U — потенциальная энергия	θ — случайная величина со средним значением, равным нулю и диапазоном от нуля до единицы
x, v — позиция и скорость частицы, соответственно	ω — весовая функция, зависящая от расстояния между частицами
r_c — радиус отсечения, при котором $\omega=0$	ϑ_0 — равновесные значения углов
e_{ij} — единичный вектор, направленный от частицы j к частице i	ϑ — текущие значения углов
b_0 — равновесные значения валентных длин	χ — сдвиг фазы
r — расстояние между частицами	k — кратность торсионного
K_b — соответствующие силовые	
K_g, K_ϕ константы	

π — масштабный фактор консервативных сил	барьера
γ — коэффициент диссипативных сил	Верхние индексы:
δ — масштабный фактор случайных сил	n — временной шаг
ϵ^* — минимум энергии взаимодействия	Нижние индексы
q — парциальный заряд напishi	i, j — номера частиц
	C—C — коллоид-коллоид
	C—S — коллоид-жидкость

ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Басок Б. И. Накорчевский А.И. Адиабатически вскипающие потоки. Теория. эксперимент, технологическое использование. Киев.: Наук. думка. — 2001. — 207 с.
2. Долинский А.А. Метод ДИВЭ в инновационных технологиях и тепломассообменном оборудовании / А.А. Долинский, Л.Н. Грабов. Т.Л. Грабова // Промышленная теплотехника. — 2012. — т. 34, № 3. — С. 18—30.
3. Witharana S., Chen H., Ding Y. Stability of nanofluids in quiescent and shear flow fields // Nanoscale Research Letters. — 2011. — v. 6. — P. 231—236.
4. Dzwinel W., Yuen L.A., Boryczko K. Mesoscopic Dynamics of colloids simulated with dissipative particle dynamics and fluid particle model // J MOL. Model. — 2002. — v. 8. — p. 33—43.
5. Dzwinel W., Yuen L.A. A two-level, discrete particle approach for large-scale simulation of colloidal aggregates // Int. Journal of Modern Physics C. — 2000. —v. II, No 5. — p. 1037— 1061.
6. Dzwinel W., Yuen L.A., Boryczko K. Bridging diverse physical scales with the discrete-particle paradigm in modeling colloidal dynamics with mesoscopic features // Chemical Eng. Science. — 2006. —v. 61. — p. 2169—2185.
7. Dzwinel W., Yuen L.A. A Two-Level, Discrete-Particle Approach for Simulating Ordered Colloidal Structures // Int. Journal of Colloid and Interface Science. — 2000. — 225. — p. 179— 190.
8. Dzwinel W., Alda W., Kitowski J., Moscinski J., Wcislo and Yuen D.. Macro-scale simulation using molecular dynamics method. Molecular Simulation 15 (1995) 343—360.
9. Herrmann, J., The importance of computer simulations of granular flow, Comput. Sci. Eng., January—February 1999, p. 72—73.
10. P. Espanol and M. Serrano, Dynamical regimes in the dissipative particle dynamics model. Phys. Rev. E, 59,6340 (1999).
11. Dzwinel W., Yuen L.A. Matching macroscopic properties of binary fluids to the interactions of dissipative particle dynamics, International Journal of Modern PhysicsC, Vol. 11. No 1.(2000). pp. 1-25.

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ**

**МИКРО-
И НАНО-
УРОВНЕВЫЕ
ПРОЦЕССЫ
В ТЕХНОЛОГИЯХ
ДИВЭ**

Тематический сборник статей

**Под общей редакцией академика НАН Украины
А.А. Долинского**

УДК 536.24

ББК 30.13

М59

Рецензенты:

академик НАН Украины А.В. КИРИЛЕНКО, директор Института электродинамики НАН Украины;

член-корреспондент НАН Украины Ю.Ф. СНЕЖКИН, заместитель директора ИТТФ НАН Украины

*Утверждено к печати Ученым советом Института технической теплофизики
НАН Украины (протокол № 11 от 10.06.2014)*

Микро- и наноразмерные процессы в технологиях ДИВЭ : М 59 Тематический сборник статей / под общей ред. А.А. Долинско-го ; Институт технической теплофизики НАН Украины. — К. : Академперіодика, 2015. — 464 с, 24 с. ил.

ISBN 978-966-360-291-2

В сборнике научных статей представлены работы ученых Института технической теплофизики НАН Украины и их коллег, посвященные фундаментальным и прикладным исследованиям метода дискретно-импульсного ввода энергии в жидкие гетерогенные среды и его механизмов для интенсификации процессов теплообмена с целью разработки энергосберегающих технологий для различных отраслей промышленности. Представляет интерес для ученых, аспирантов, инженеров, специализирующихся в области теплообмена, гидродинамики, разработке технологий смешивания, гомогенизации, получения наноструктур, экстракции, ферментации, аэрации, дегазации, эмульгирования, измельчения, концентрирования и гранулирования, а также аппаратов для их осуществления.

ISBN 978-966-360-291-2

© Институт технической теплофизики

НАН Украины, 2015 © Академперіодика. оформление, 2015

Содержание

ПОСТАНОВЛЕН ИЕ ПРЕЗИДИУМА АН УССР от 01.12.1982 № 499 "Метод дискретно-импульсного ввода энергии в дисперсные среды и перспективы его использования в народном хозяйстве".....	3
<i>Долінський А.А.</i> Принцип дискретно-імпульсного вводу енергії та його використання у технологічних процесах.....	5
<i>Долинский А.А., Накорчевский А. И.</i> Системный анализ эволюции технических решений при реализации ДИВЭ.....	15
<i>Иваницкий Г.К.</i> Наномасштабные эффекты в процессах кавитации. I. Паровая кавитация	22
<i>Иваницкий Г. К.</i> Наномасштабные эффекты в процессах кавитации. II. Критерий разрушения кавитационных пузырьков	29
<i>Иваницкий Г. К., Корчинский А.А., Матюшкин М.В.</i> Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа.....	38
<i>Басок Б.И., Чайка А.И., Новицкая М.П.</i> Гидродинамика и теплообмен в пульсирующей дисперсной среде.....	48
<i>Шаркова Н.Ю., Жукотський Е.К., Грищенко Г.В.</i> Особливості технології виробництва соєвих продуктів.....	56
<i>Долінський А.А., Шаркова Н.О., Авдеева Л.Ю., П'янкова О.В., Надточій Н.І.</i> Сучасна технологія виробництва функціональних напоїв на основі сої	60
<i>Басок Б.И., Давыденко Б.В.</i> Особенности гидродинамики, теплопереноса и процессов диспергирования в рабочих объемах цилиндрических роторно-пульсационных аппаратов.....	62
<i>Долинский А.А., Шаркова Н.А., Терлецкая Я. Т., Авдеева Л.Ю., Жукотский Э.К., Грищенко А.В., Горчев В.Ф.</i> Получение липосомных наносистем с использованием эффекта дискретно-импульсного ввода энергии.....	85
<i>Басок Б.И., Давыденко Б.В., Ободович А.Н., Пироженко И.А.</i> Диссипация энергии в активной зоне роторно-пульсационного аппарата.....	90
<i>Басок Б.И., Давыденко Б.В., Ободович А.Н.</i> Численное моделирование процесса перемешивания взаимнорастворимых жидкостей в роторно-пульсационном аппарате.....	98
<i>Долінський А.А., Шаркова Н.О., Авдеева Л.Ю., П'янкова О.В., Надточій Н.І., Зайцева Н. Є.</i> Розробка та впровадження нових технологій виробництва вітчизняних функціональних продуктів на соєвій основі	105
<i>Долінський А. А., Шаркова Н.О., Авдеева Л.Ю., Лопатін О.О., П'янкова О. В.</i> Особливості технології виробництва нового вітчизняного функціонального продукту харчування.....	111
<i>Долинский А.А., Шаркова Н.А., Авдеева Л.Ю.</i> Анализ и прогнозирование адаптивности липосомной системы при дискретно-импульсном вводе энергии.....	115
<i>Долинский А.А., Иваницкий Г. К., Ободович А.Н.</i> Использование механизмов ДИВЭ при роторно-пульсационной обработке гетерогенных сред.....	120

<i>Иваницкий Г.К.</i> Численное моделирование динамики кавитационного пузырька в акустическом поле.....	131
<i>Долинский А.А., Шурчкова Ю.Л., Иваницкий Г.К., Целень Б.Я.</i> Оптимизация тепломассообменных и гидродинамических процессов в технологии термовакуумной обработки молока.....	136
<i>Авдеева Л.Ю.</i> Оптимізація тепломасообмінних режимів. Одержання наноструктур.....	148
<i>Авдеева Л.Ю.</i> Метод інтенсифікації процесу отримання ліпосомних наноструктур при дискретно-імпульсному введенні енергії.....	153
<i>Авдеева Л.Ю., Иваницкий Г.К.</i> Применение гидродинамической кавитации в технологическом процессе получения фосфолипидных наноструктур.....	158
<i>Долинский А.А., Грабова Т.Л.</i> Применение метода дискретно-импульсного ввода энергии для получения структурированных спиртсодержащих систем.....	167
<i>Долинский А.А., Грабов Л.Н., Грабова Т.Л., Переяславцева Е.А.</i> Влияние гидродинамической обработки методом ДИВЭ на структуру и сорбционные свойства ксерогелей.....	174
<i>Иваницкий Г.К., Шурчкова Ю.Л., Радченко Н.Л.</i> Моделирование процесса экструзии в предматричной зоне и в матрице при обработке растительного сырья.....	183
<i>Долинский А.А., Шурчкова Ю.Л., Недбайло А.Е.</i> Влияние тепломассообменных и гидродинамических процессов на состояние молочных белков.....	192
<i>Шаркова Н.А., Авдеева Л.Ю., Жукотский Э.К., Козак Н.Н.</i> Повышение эффективности экстракции биологически активных веществ из коллагенсодержащего сырья.....	195
<i>Турчина Т.Я.</i> Теоретичний аналіз тепломасопереносу при сушінні крапель структурованих рослинних систем.....	200
<i>Авдеева Л.Ю.</i> Енергоефективна технологія отримання фосфоліпідних наноструктур.....	205
<i>Долинський А.А., Шаркова Н.О., Авдеева Л.Ю., Чуніхін О.Ю.</i> Дослідження властивостей фосфоліпідних наноструктур, отриманих з використанням ефекту дискретно-імпульсного введення енергії.....	210
<i>Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е.</i> Аналитическое исследование кавитации в рабочем колесе центробежных насосов.....	215
<i>Долинский А.А., Грабов Л.Н., Грабова Т.Л.</i> Реализация метода ДИВЭ в теплотехнологиях и оборудовании фармацевтической промышленности.....	225
<i>Dolinsky A.A., Grabov L.N., Moskalenko A.A., Grabova T.L.</i> DPIE System to Improve Cooling Capacity of a Canola Oil to be Used as a Quenchant.....	241
<i>Иваницкий Г.К., Шурчкова Ю.А., Недбайло А.Е.</i> Использование гидродинамической кавитации для разрушения бактериальных клеток в технологии обработки молока.....	247
<i>Авдеева Л.Ю., Кравченко С.О.</i> Дослідження властивостей везикулярних фосфоліпідних наноструктур з біологічно активними речовинами.....	257
<i>Шаркова Н.А., Жукотский Э.К., Авдеева Л.Ю., Козак Н.Н.</i> Оптимизация условий проведения термовлажностной обработки коллагенсодержащего сырья за счет дискретно-импульсного ввода энергии.....	261

<i>Шаркова Н.О., Жукотський Е.К., Авдеева Л.Ю., Козак М.М., Костянець Л.О.</i> Оптимізація умов отримання водорозчинного екстракту із колагенвмісної сировини.....	264
<i>Долинский А.А., Грабов Л.Н., Москаленко А.А., Грабова Т.Л.</i> Применение метода ДИВЭ для получения новых мезо- и наножидкостей.....	270
<i>Dolinsky A.A., Grabov L.N., Moskalenko A.A., Grabova T.L.</i> The Research of Cooling Intensity of Micro- and Nanofluids Obtained by DPIE Method to be Used as a Quenchant for Hardening of Steel Parts and Tools.....	276
<i>Долинский А.А., Грабов Л.Н., Посунько Д.В., Шматок А.И.</i> Получение жидких биотопливных смесей методом дискретно-импульсного энергетического воздействия.....	284
<i>Долинский А.А., Шурчкова Ю.А.</i> Вода в условиях обработки ДИВЭ.....	292
<i>Чайка О.І., Гоженко Л.П., Іваницький Г.К., Корінчук Д.М.</i> Інтенсифікація процесу диспергування низинного торфу із застосуванням пульсаційного диспергатора.....	300
<i>Долінський А.А., Авраменко А.О., Іваницький Г.К.</i> Фізичні основи, математичні підходи та технологічні аспекти використання методу ДІВЕ для керування кінетикою протікання нанорівневих процесів в дисперсних та супрамолекулярних системах.....	308
<i>Ободович А.Н., Лымарь А.Ю.</i> Дискретно-импульсный ввод энергии (ДИВЭ) — интенсифицирующий метод гидролиза высокомолекулярных соединений.....	324
<i>Ободович А.Н., Сидоренко В.В., Лымарь А.Ю., Миронец И.Н.</i> Использование дискретноимпульсного метода ввода энергии (ДИВЭ) для интенсификации приготовления жидких кормов для сельскохозяйственных животных на основе барды.....	333
<i>Авдеева Л.Ю.</i> Дослідження масообмінних процесів при кавітаційній обробці рідких гетерогенних середовищ.....	339
<i>Долінський А.А., Шурикова Ю.О., Цельнь Б.Я.</i> Безреагентна нейтралізація кислого конденсату продуктів згорання природного газу та обладнання для її реалізації.....	343
<i>Долінський А.А., Турчина Т.Я., Жукотський Е.К.</i> Сучасні методи впливу на структуруючі властивості складних матеріалів як об'єктів розпилювального сушіння.....	351
<i>Долинский А.А., Авраменко А.А., Тыринов А.И., Грабова Т.Л.</i> Динамика структурообразования коллоидных агрегаций.....	358
<i>Ободович А.Н., Лымарь А.Ю.</i> Исследование гидравлических характеристик роторно-пульсационного аппарата при обработке водозерновой смеси.....	366
<i>Басок Б.И., Гоцуленко В.В., Авраменко А.А.</i> Применение ДИВЭ для управления неустойчивостью вскипающего потока и эффектов кавитации.....	371
<i>Басок Б. И., Давыденко Б.В.</i> Применение технологии ДИВЭ при производстве моногранулированных продуктов.....	404
<i>Долинский А.А., Басок Б.И.</i> Наномасштабные эффекты при дискретно импульсной трансформации энергии.....	422
<i>Басок Б.И., Рыжков С.С.</i> Применение эффектов дискретно-импульсного ввода энергии для улавливания жидких частиц потока аэрозоля.....	438
СПИСОК АВТОРОВ.....	459