

ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ В ЭКОТЕХНОЛОГИЯХ



www.e.lanbook.com



**ЭБС
ЛАНЬ**

ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ В ЭКОТЕХНОЛОГИЯХ

Монография



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •
• МОСКВА • КРАСНОДАР •
• 2018 •

ББК 20.1я73
Д 25

Д 25 Двухфазные потоки в экотехнологиях: Монография. — СПб.: Издательство «Лань», 2018. — 144 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-3022-2

В книге изложены результаты экспериментального и численного исследования двухфазных потоков применительно к задачам экотехнологий. Рассмотрены следующие задачи: оценка технологических процессов переработки и удаления пищевых отходов, как источников негативных воздействий и загрязнений городской среды, анализ существующих способов переработки и удаления пищевых отходов из мест их образования; разработка решений по снижению негативного воздействия пищевых отходов на окружающие экосистемы, разработка численной модели двухфазных потоков в процессах утилизации пищевых отходов. Разработаны рекомендации к проектированию интегрированных систем переработки пищевых отходов и канализационных сетей городского хозяйства.

Книга предназначена для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки и специальностям, входящим в УГС: «Химические технологии», «Промышленная экология и биотехнологии», «Техносферная безопасность и природообустройство». Представляет интерес для аспирантов, преподавателей, научных сотрудников и специалистов в области экотехнологий.

ББК 20.1я73

Рецензенты:

С. В. МЕЩЕРИКОВ — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой промышленной экологии Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина, лауреат Государственной премии РФ;

Э. А. ТАИРОВ — главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН.

Обложка

Ю. В. ГРИГОРЬЕВА

© Издательство «Лань», 2018

© Коллектив авторов, 2018

© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Городское хозяйство по определению должно быть экологически целесообразным и экологически безопасным. Важным критерием экологической целесообразности его работы является комплексная переработка твердых бытовых отходов (ТБО), обеспечивающая в совокупности малую отходность производств и уменьшение уровня загрязнений городской среды. Наиболее рациональным способом достижения цели здесь является изъятие и использование пищевых отходов из общего потока ТБО.

Норматив накопления твердых бытовых отходов на одного жителя г. Москвы в объеме $1,31 \text{ м}^3$ (262 кг) в год [80], следовательно, в сутки человек производит 0,72 кг отходов. Исходя из усредненного состава бытового мусора, представленного на рисунке В1, ежедневно один житель г. Москвы производит 0,21 кг пищевых отходов.

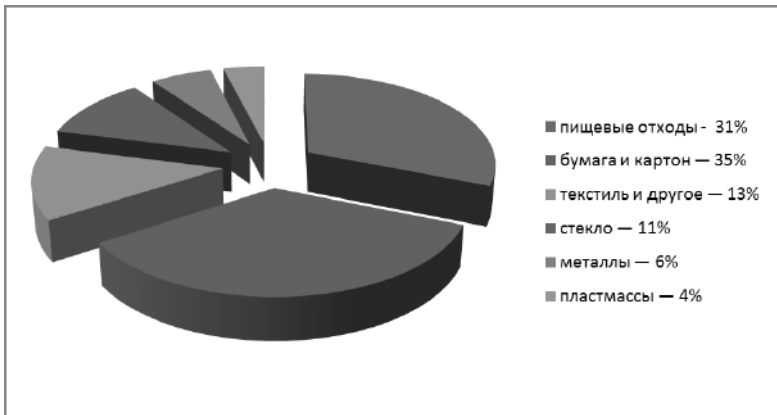


Рис. В1

Усредненный фракционный состав ТБО для Москвы [81, 85, 98]

Пищевые отходы в составе ТБО, как видно из рисунка В1, составляют 31% [81]. Фракционный состав пищевых отходов для Москвы [81, 85, 98] представлен на рисунке В2.

На сегодняшний день существуют несколько технологий утилизации отходов:

- термическая утилизация на специальных заводах;
- полигонное захоронение;
- сортировка ТБО с целью извлечения полезных фракций.

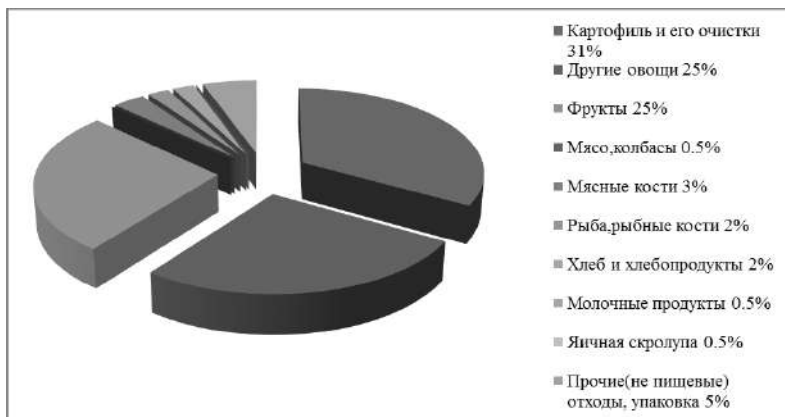


Рис. В2

Усредненный фракционный состав пищевых отходов для Москвы

Общая экологическая проблема перечисленных технологий — это наличие пищевых отходов, которые приводят к нежелательному увлажнению и загрязнению ТБО. Для изменения данной ситуации неоднократно предполагалось внедрить селективный сбор ТБО, но из-за отсутствия рациональной организации, экономических стимулов у населения и необходимого начального финансирования данная идея не получила развития в нашей стране.

В то же время изъятие пищевых отходов из общего потока ТБО в местах их образования позволит:

- уменьшить антропогенное воздействие ТБО на окружающие экосистемы за счет уменьшения на 20–35% объема вывоза ТБО на полигоны для захоронения, что, в свою очередь, снизит и негативное воздействие автотранспорта на городскую среду;
- снизить загрязнение санитарных зон пищевыми отходами (на контейнерных площадках), которые являются кормовой базой грызунов и птиц — разносчиков опасных инфекций;
- уменьшить антропогенное воздействие ТБО на окружающие экосистемы за счет увеличения объема и повышения качества рециклируемых фракций.

Пищевые отходы относятся к числу биологических отходов, и их обезвреживание является одной из актуальных проблем обеспечения экологической безопасности населения. Одной из перспективных технологий для удаления пищевых отходов из ТБО является внедрение в практику городского хозяйства измельчителей пищевых отходов.

дов (диспоузеров), но существующие на рынке аппараты не могут перерабатывать волокнистые, жировые и пленочные отходы растительного и животного происхождения, в результате образуются настывы в трубопроводах от диспоузера к канализационной сети, а также крупные костные отходы, что приводит к поломке дробящих ножей и их выходу из строя.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) выполнен сравнительный анализ эколого-экономической эффективности существующих способов переработки и удаления пищевых отходов из мест их образования как источников негативных воздействий и загрязнений городской среды;

2) разработаны организационно-технические предложения по снижению негативного воздействия пищевых отходов на окружающие экосистемы;

3) разработана новая конструкция шарошечного измельчителя пищевых отходов в местах их образования, обеспечивающая повышение экологической безопасности системы обращения с ТБО в городах, выполнено ее экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование;

4) получена сравнительная оценка степени снижения уровня антропогенного воздействия на окружающие экосистемы и необходимых затрат при реализации разработанных решений по переработке и удалению пищевых отходов в местах их образования;

5) выполнено расчетное исследование изменения нагрузки на очистные сооружения городского жилищно-коммунального хозяйства в результате внедрения процесса и аппаратуры пульповой переработки пищевых отходов в местах их образования и их удаления по канализационным сетям;

6) разработаны рекомендации по использованию процесса и аппаратуры пульповой переработки пищевых отходов в местах образования и их удаления по канализационным сетям в жилищно-коммунальном хозяйстве, на предприятиях общественного питания и пищевой промышленности.

Научная новизна приведенных исследований заключается в:

- разработке комплексного подхода к решению проблемы уменьшения уровня загрязнений городской среды пищевыми отходами путем создания экологически безопасного метода их пульповой переработки в местах образования и удаления по городским канализационным сетям на очистные сооружения;

- результатах экспериментального исследования и численного моделирования процесса переработки и канализационной транспортировки пищевых отходов с частицами различного размера и свойств на основе полумпирических моделей гидродинамики многофазного течения;

- результатах численного компьютерного моделирования с помощью программы Solid Works Flow Simulation прочностных характеристик элементов конструкций измельчителей пищевых отходов в процессе переработки пищевых отходов;

- разработке инженерной методики расчета параметров экологической эффективности, энерго- и ресурсоемкости этапов обращения с городскими пищевыми отходами, позволяющей прогнозировать степень снижения негативного воздействия пищевых отходов на окружающую среду при внедрении экологически безопасного метода их пульповой переработки в местах образования и удаления по городским канализационным сетям на очистные сооружения.

Представленные результаты обладают следующей практической значимостью:

- сформулированы организационно-технические предложения по развитию системы обращения с ТБО городского хозяйства, позволяющие провести экологически безопасное технологическое обновление оборудования для обращения с пищевыми отходами домовладений, производственных предприятий пищевой промышленности и общественного питания, расположенных в городской среде;

- по результатам исследований разработаны рекомендации к применению в проектах бытовых канализационных сетей, сетей производственных предприятий пищевой промышленности и общественного питания, расположенных в городской среде шарошечных измельчителей пищевых отходов;

- разработана новая конструкция шарошечного измельчителя пищевых отходов, образовавшихся в городском хозяйстве, позволяющая перерабатывать все фракции пищевых отходов, включая твердые костные, волокнистые, жировые и пленочные отходы растительного и животного происхождения.

Глава 1

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРОБЛЕМ ОБРАЩЕНИЯ С ПИЩЕВЫМИ ОТХОДАМИ

1.1. Аналитический обзор технологий переработки пищевых отходов

Задача обзора заключается в оценке существующих технологий по переработке пищевых отходов. Обоснование способов переработки пищевых отходов. Анализ исследований, проводимых в области переработки пищевых отходов.

1.1.1. Технология микробиологической биоконверсии [1]

Суть технологии биоконверсии (рис. 1.1) заключается в следующем [2]: сырьевые компоненты (пищевые отходы), содержащие сложные полисахариды — пектиновые вещества, целлюлозу, гемицеллюлозу и другие, подвергаются воздействию комплексных ферментных препаратов, содержащих пектиназу, гемицеллюлазу и целлюлазу.

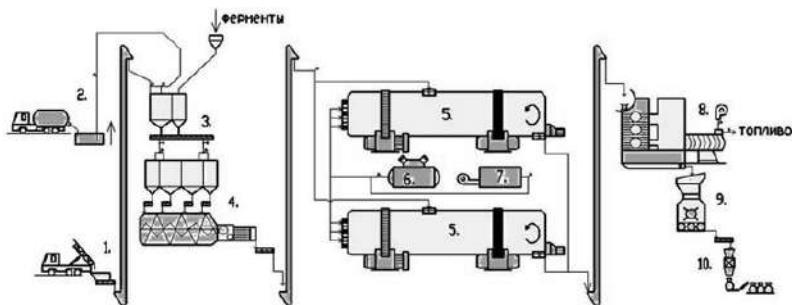


Рис. 1.1

*Технологическая схема микробиологической переработки
растительных отходов в корм:*

1 — прием сыпучего и влажного сырья; 2 — прием жидкого сырья; 3 — бункеры-дозаторы; 4 — смеситель; 5 — биореактор; 6 — компрессор; 7 — парогенератор; 8 — сушилка; 9 — измельчитель; 10 — отгрузка в мешки.

Ферменты представляют собой очищенный внеклеточный белок и способны к глубокой деструкции клеточных стенок и отдельных структурных полисахаридов [3], т. е. осуществляется расщепление сложных полисахаридов на простые с последующим построением на их основе легкоусвояемого кормового белка.

В процессе биоконверсии [4] в некондиционных компонентах уничтожаются болезнетворная микрофлора, яйца гельминтов, возбудители тяжелых заболеваний (бруцеллез, туберкулез, холера, тиф и др.), а также вредные паразитирующие простейшие (аскариды, солитеры и др.).

При этом кормовая ценность некондиционного сырья после соответствующей обработки превышает кормовую ценность кондиционных аналогов в 1,4–1,8 раз [5]. После завершения процесса биоконверсии получаемым конечным продуктом является кормовая добавка — углеводно-белковый концентрат [6] (УБК), который приобретает кормовые свойства, в 1,8–2,4 раза превосходящие фуражное зерно хорошего качества, а также обладает рядом существенных и необходимых свойств, которыми не обладает традиционное зерновое сырье.

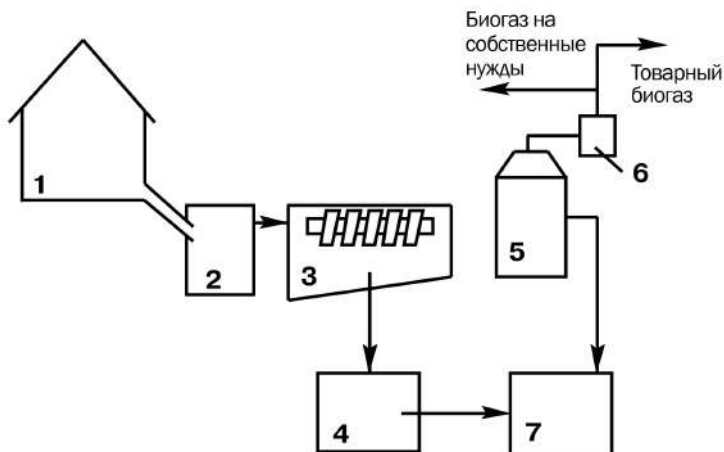
Такие методы решают сразу несколько задач:

- сбора и переработки пищевых отходов с улавливанием и нейтрализацией вредоносных биогазов;
- получение экологически чистых удобрений, а также метана для мини-ТЭЦ;
- газообразного топлива для автотракторной техники;
- обеспечения работы бесфреоновых охладителей;
- производства «сухого» льда.

Недостаток указанного способа: получаемые при этом гидролизаты представлены в виде водного раствора, и для их дальнейшего использования необходимы стадии отделения воды, сушки, а также очистки сточных вод, что нерентабельно.

1.1.2. Биоэнергетические методы утилизации [7]

Технология термической деполимеризации (TDP) [8] позволяет из углеводородных и органических отходов получать газообразное, жидкое и твердое топливо, некоторые химикаты и удобрения. Первая стадия проходит при 250–350°C, вторая — при 500–700°C. Получаемые масла аналогичны дизельному топливу с 8–20 углеродными атомами, насыщенными и ненасыщенными жирными кислотами с 16–18 углеродными атомами. Твердые удобрения подобны апатитам, жидкие содержат 25–28% сульфата аммония [9].



1 — производитель органического сырья; 2 — сборники исходного сырья;
 3 — центрифуга; 4 — биоферментер; 5 — метантенк; 6 — газгольдер;
 7 — помещение для расфасовки.

Это прекрасное удобрение, в котором снижена подвижность азота и изменено в лучшую сторону соотношение N:P.

Недостатком указанного способа является сложная рецептура питательной смеси с использованием дорогостоящих реагентов при весьма низкой производительности по конечному продукту.

1.1.3. Экструзионная переработка пищевых отходов [10]

Полный технологический процесс экструзионной переработки представлен на рисунке 1.3.

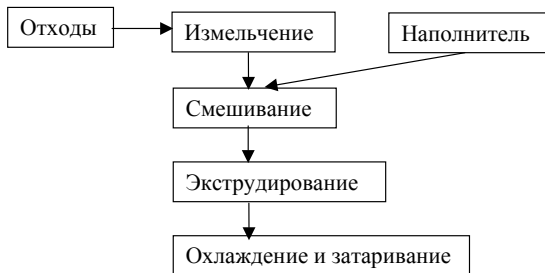


Рис. 1.3

Технологическая линия экструзионной переработки отходов

Для получаемого продукта (белковой кормовой добавки) характерны:

- содержание протеина — 14–20% (в зависимости от вида перерабатываемых отходов и растительного наполнителя);
- высокая усвояемость (порядка 90%);
- обменная энергия — 290–310 ккал в 100 г;
- бактериальная чистота — не более 20 тыс. ед. (при норме 500 тыс. ед.);
- влажность — не выше 14%;
- длительный срок хранения — не менее 6 месяцев.

Необходимое условие достижения этой цели [11] — термообработка отходов, в ходе которой происходят обеззараживание и обезвоживание сырья. От правильности её проведения зависит качество получаемого корма.

Традиционно наиболее распространена многочасовая термообработка при повышенном давлении в аппаратах периодического действия, в частности в вакуумных котлах (котлах-утилизаторах Лапса [12]) сухим (без контакта с острым паром или водой) или мокрым способом. В таких котлах сырьё медленно нагревается до температуры 118–130°C, при которой погибает основная масса бактерий, и стерилизуется в течение 30–60 минут при давлении 0,3–0,4 МПа. Затем разваренная масса сушится в течение нескольких часов под давлением 0,05–0,06 МПа при 70–80°C. Необходимо отметить, что в последнее время в странах ЕС стерилизацию проводят при температуре 133°C и давлении 0,3 МПа в течение 20 минут, без учёта времени на подъём и спуск давления пара в котле [13].

Можно выделить следующие **основные недостатки**:

- длительность процесса получения готового продукта (до 10–12 часов);
- многочасовая термообработка приводит к денатурации 70–75% протеина, в результате снижается кормовая ценность продукта (он плохо усваивается птицей);
- высокая энергоёмкость: для работы установок помимо электроэнергии необходимы газ, пар и горячая вода;
- загрязнение окружающей среды неприятно пахнущими и токсическими веществами (сероводородом, сернистым газом, меркаптанами и др.);
- образование жиросодержащих сточных вод, увеличивающих нагрузку на локальные очистные сооружения.

1.1.4. Вермикультурная переработка пищевых отходов [14]

Пищевые отходы имеют высокую влажность и не содержат ценных для промышленности элементов. В результате эти отходы плохо горят, нередко плохо прессуются и быстро распадаются на простейшие соединения.

Наиболее очевидным способом утилизации подобных отходов является их переработка в компост [15]. С середины XX века набирает популярность технология вермикультивирования — переработки отходов дождевыми червями (как правило, красным калифорнийским или его гибридами, адаптированными к местным условиям).

Вермикультура — это современная биотехнология, с помощью которой возможно пищевые отходы эффективно превращать в полноценные животные белки.

Биомасса дождевых червей является уникальным и возобновляемым природным сырьем для получения всевозможных препаратов биологически активных веществ. Время удвоения биомассы дождевых червей составляет от 30 до 60 дней [16].

Позволяет получать гумус, гораздо более плодородный, чем обычный компост, однако культивирование дождевых червей — непростая технология, требующая контроля за качеством отходов.

Пищевые отходы, собираемые в обычных городах, могут содержать какие угодно загрязнители. Эта опасность вынуждает вносить все удобрения, полученные в результате переработки, только в почвы, не имеющие сельскохозяйственного значения. Например, в городские газоны и парки.

Недостатки указанного способа:

- необходимость поддержания соответствующих условий для функционирования вермокультуры [17];
- узкий профиль применения получаемого сырья.

1.2. Аналитический обзор оборудования для переработки пищевых отходов

1.2.1. Биогазовая установка сбраживания пищевых отходов [18]

Изобретение (рис. 1.4) предназначено для микробиологической анаэробной конверсии пищевых отходов в биогаз.

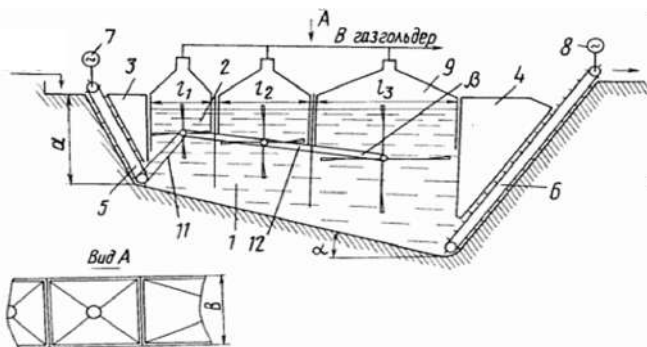


Рис. 1.4

Биогазовая установка:

- 1 — реактор; 2 — секция; 3 — узел загрузки; 4 — узел выгрузки;
5, 6 — пластинчатый транспортер; 7, 8 — приводы; 9 — сборник газа;
10 — мешалки; 11, 12 — цепная передача.

Технические характеристики

Установка содержит многосекционный реактор и наклонные мешалки, что обеспечивает более полное разложение биомассы, интенсифицируя процесс выделения газов.

Установка состоит из расположенного под землей реактора 1, разделенного на секции 2, узлов загрузки 3 и выгрузки 4 с пластинчатыми транспортерами 5, 6 и приводами 7, 8. Секции реактора снабжены колоколообразными сборниками газа 9 и мешалками 10. Секции 2 сообщаются между собой в нижней части броидильной емкости. Вращение мешалок осуществляется от привода 7 транспортера 5 узла загрузки 3 через цепную передачу 11. Мешалки связаны между собой цепной передачей 12.

Недостатки установки заключаются в том, что барботирование приводит к выносу твердых включений биомассы на ее поверхность, что интенсифицирует расслоение биомассы, снижая эффективность переработки, а также увеличивает значительно энергетические затраты на компримирование и перекачивание биогаза.

1.2.2. Микробиологический реактор для переработки пищевых отходов [19]

Изобретение [19] (рис. 1.5) позволяет сбраживать пищевые отходы и может использоваться для получения удобрений и горючих газов.

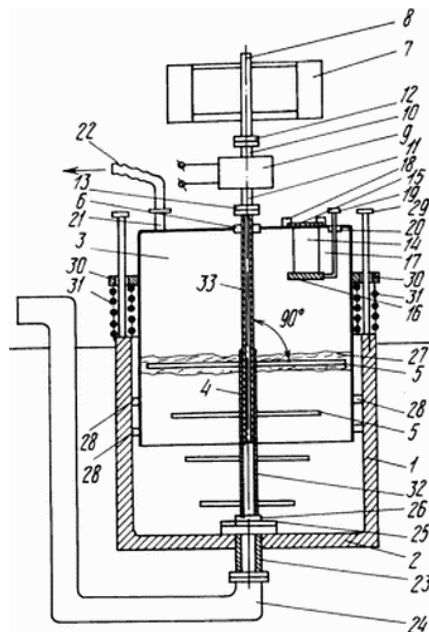


Рис. 1.5

Микробиологический реактор:

1 — камера; 2 — днище; 3 — газовый колпак; 4 — цилиндрический элемент;
 5 — стержни; 6 — магнитожидконостный уплотнитель; 7 — ветросиловая установка с лопастями; 8, 10, 11 — вал; 9 — генератор-электродвигатель; 12, 13 — муфта; 14 — загрузочный шлюз; 15, 16 — внешний и внутренний люк; 17 — корпус; 18 — зажим; 19 — шток; 20 — магнитожидконостное уплотнение;
 21 — технологический патрубок; 22 — труба; 23 — патрубок выгрузки;
 24 — соединительная труба; 25 — сетка; 26 — опора; 27 — плотная корка;
 28 — уплотнение; 29 — вертикальные направляющие; 30 — втулка; 31 — пружина; 32, 33 — внешний и внутренний шлиц.

Технические характеристики

Цилиндрический элемент 4 загерметизирован в месте прохода его через плавающий колпак 3 магнитожидконостным уплотнителем 6. На плавающем колпаке 3 установлена ветросиловая установка 7 с лопастями, установленными вертикально на валу 8, служащая в качестве привода для вращения цилиндрического элемента 4 со стержнями 5. Крепление ветросиловой установки 7 на плавающем колпаке 3 осуществляется металлической фермой. На валу 8 ветросиловой установки 7

установлен генератор-электродвигатель 9, который является обратимым, т. е. может работать генератором электроэнергии при вращении его ветросиловой установкой 7 либо электродвигателем при подаче на него электроэнергии от постороннего источника тока (не показан). Генератор-электродвигатель 9 имеет валы, выходящие на две его стороны: вал 10, выходящий в сторону вала 8 ветросиловой установки 7, и вал 11, выходящий в сторону цилиндрического элемента 4 со стержнями 5 цилиндрической камеры сбраживания 1. Вал 8 ветросиловой установки 7 и вал 10 генератора-двигателя 9 соединены муфтой 12. Цилиндрический элемент 4 со стержнями 5 цилиндрической камеры сбраживания 1 и вал 11 генератора-двигателя 9 соединены муфтой 13. В верхней части плавающего колпака 3 установлен герметический загрузочный шлюз 14, имеющий внешний 15 и внутренний 16 люки и корпус 17. Внешний люк 15 герметизируется быстросъемными зажимами 18. Внутренний люк 16, находящийся внутри цилиндрической камеры сбраживания 1, открывается и герметизируется штоком 19, проходящим через плавающий колпак 3 в магнитоэластичном уплотнении 20 с возможностью осевого и вращательного движения. На плавающем колпаке 3 установлен технологический патрубок 21 с гибкой трубкой 22 для отвода биогаза. Днище 2 снабжено патрубком 23 выгрузки сброженной массы, соединенной с трубой 24. Над патрубком 23 на днище 2 установлена крупноячеистая сетка 25 для задержания крупных несброженных отходов, на которой установлена опора 26 цилиндрического элемента 4. Масса, сбраживаемая в цилиндрической камере 1, образует на своей поверхности плотную корку 27. Плавающий колпак 3 в местах соприкосновения с внутренней поверхностью цилиндрической камеры сбраживания 1 снабжен уплотнениями 28. По торцу цилиндрической камеры сбраживания 1 установлены вертикальные направляющие 29, соединенные втулками 30 с плавающим колпаком 3. Для снижения и регулирования давления биогаза в реакторе на вертикальных направляющих 29 установлены пружины 31, на которые плавающий колпак 3 опирается своими втулками 30. Пружины 31 снабжены устройством для регулировки их длины.

1.2.3. Бытовой метантенк [19]

Предлагаемый бытовой метантенк решает экологические проблемы вокруг индивидуальных домов, обеспечивает владельцев биогазом для нужд отопления, приготовления пищи, нагрева воды, освещения с одновременной выработкой биоудобрения, не имеющего запаха и эквивалентного 3–4 тоннам комплексного минерального удобрения.

Технические характеристики

Метантенк (рис. 1.6) содержит корпус с перегородками камер кислого, нейтрального, щелочного, метанового брожения, а также размещенное между патрубками загрузки и выгрузки сред перемешивающее устройство, включающее приводной вал с лопастями, и теплообменное устройство термостатирования процесса брожения.

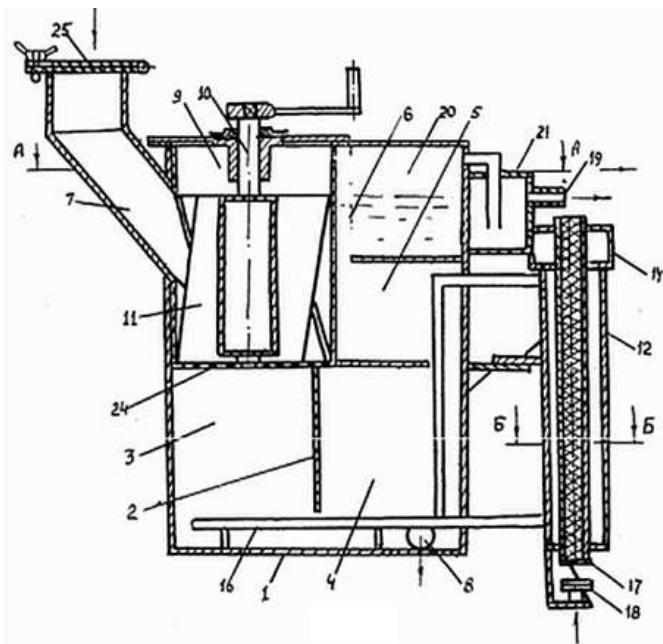


Рис. 1.6

Бытовой метантенк:

1 — корпус; 2 — стенка; 3–6 — камеры; 7, 8 — патрубок; 9 — перемешивающее устройство; 10 — приводной вал; 11 — лопасти; 12 — стенка; 14 — упор; 15 — полость; 16 — нагреватель; 17 — стенка; 18 — горелка; 19 — патрубок; 20 — газовая полость; 21 — затвор; 22 — засыпка; 23 — выступы; 24 — днище.

Теплообменное устройство выполнено в виде концентрично установленных вне корпуса внешней и внутренней труб, причем внешняя выполнена с расширительным сосудом в верхней части и ее внутренняя полость сообщена с погружным водяным нагревателем, размещенным во внутренней полости корпуса метантенка, а внутренняя труба сеткой, под которой размещена горелка, сообщенная с патрубком

ком отвода биогаза из газовой полости через гидравлический затвор, а над сеткой размещена засыпка из железных стружек, причем вверх внутренняя труба сообщена с атмосферой помещения, в котором установлен метантенк.

Эксплуатация осуществляется следующим образом: фекально-бытовые стоки и углерод-азотсодержащие отходы (отходы овощей и фруктов, листовой опад, макулатуру и т. д.) при открытой крышке 25 загружают через патрубок 7 в перемешивающее устройство 9 и измельчают при вращении приводного вала 10 между винтовыми лопастями 11 и выступами 23, размещенными на боковой поверхности. При этом лопасти 11 и выступы 23 установлены под углом друг к другу, что обеспечивает измельчение взвесей до размеров частиц сопоставимых с размерами микроорганизмов в камерах 3–6 брожения, причем взвеси переходят из перемешивающего устройства 9 в камеру 3 кислого брожения через перфорированное днище 24.

Биогаз собирают в газовой полости 20 и отводят потребителю через гидравлический затвор 21 по патрубку 19. Периодически часть биогаза направляют в горелку 18 и теплом сгорания нагревают на сетке 17 засыпку 22 из железных стружек и от нее воду в полости 15, которая сообщена с погружным нагревателем 16, размещенном в корпусе 1, причем нагрев осуществляют в условиях естественной циркуляции воды.

Описанное термостатирование обеспечивает КПД теплообменного устройства порядка 100%. Отработанную массу выводят через патрубок 8. Загрузку, измельчение взвесей, разгрузку, термостатирование осуществляют периодически. Перемешивание в камерах 3–6 осуществляют при встряхивании корпуса 1.

Недостатки данного метантенка:

1) требуются большие энергетические затраты на перемещение материала из камеры маточной закваски в камеры основного брожения в связи с тем, что материал может загружаться только сверху;

2) не полностью выгружается отработанный материал, так как нет возможности разделять сбрасываемый материал по полноте отработанности;

3) сливной стояк имеет выход в верхней части метантенка, поэтому требуются большие энергетические затраты на выгрузку материала;

4) повышенные сложность конструкции и стоимость метантенка вызваны конструкцией пяти камер с перегородками, которые создают и неудобства в эксплуатации.

1.2.4. Аппарат для последовательного пофазного анаэробного сбраживания [20]

Изобретение (рис. 1.7) предназначено для сбраживания твердых неизмельченных, несортированных и неразжиженных пищевых отходов городов и поселков. Позволяет получать высококачественные обеззараженные от патогенной микрофлоры, гельминтов, их яиц и семян сорняков жидкие минерализованные органические удобрения с высоким содержанием гумуса, а также горючий биогаз.

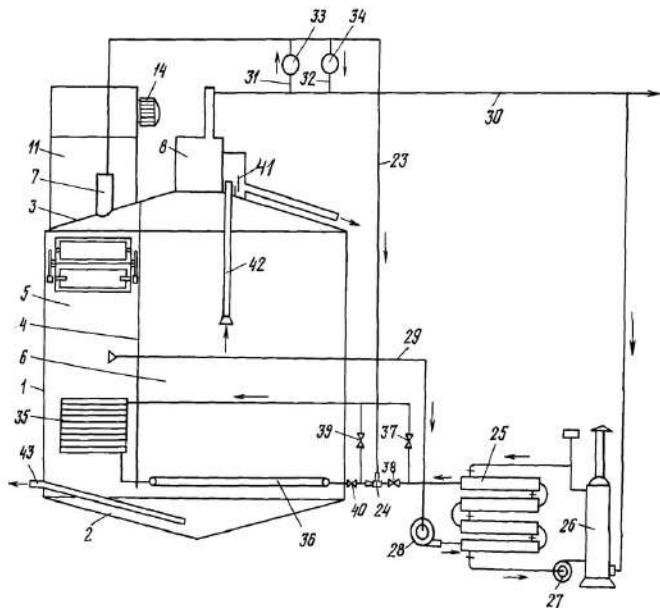


Рис. 1.7

Аппарат для последовательного пофазного анаэробного сбраживания:

1 — резервуар; 2 — днище; 3 — купол; 4 — перегородка; 5, 6 — малая и большая камера; 7, 8 — газосборники; 9 — горловина; 10 — фланец; 11 — Г-образный элеватор; 12, 13 — патрубки загрузки и выгрузки; 14 — привод; 15 — ведущий, направляющий и боковая звездочка; 18, 19 — верхняя и нижняя печечно-скребковая ветвь; 20–22 — сетка; 23 — газопровод; 24 — ижектор; 25 — теплообменник; 26 — нагреватель; 27, 28 — насос; 29, 30 — патрубок; 31, 32 — два параллельных газопровода; 33 — клапан ввода биогаза; 34 — редукционный клапан; 35 — радиатор; 36 — рассредоточитель потока; 37–40 — регулировочные вентили; 41 — шибер; 42 — переливная труба; 43 — сливной патрубок.

Технические характеристики

Сбраживание без измельчения и сортировки осуществляют в два этапа. В первой зоне резервуара, обособленной газоводопроницаемой перфорированной ограждающей перегородкой (решетом, сеткой), сбраживание ведется симбиозом расщепляющих (гидролизующих) микроорганизмов.

Продукты их жизнедеятельности в виде жирных кислот, аминокислот и других выделений выводят через перфорированное ограждение обособленной зоны в нижнюю часть резервуара метантенка, где благодаря им идет вторая фаза анаэробного сбраживания метаногенными микроорганизмами с образованием горючего биогаза.

Газ пропускают снизу вверх через зону первой фазы сбраживания и через газосборник выводят из метантенка, тогда как несброженные твердые органические отходы и несбраживаемые неорганические включения (загружаемые без их сортировки) остаются на перфорированном ограждении (решете, сетке) и легко выгружаются.

Первая фаза сбраживания проходит в кислой среде с pH менее 7,0, а вторая — в щелочной среде с pH более 7,2. Ввод отходов в верхнюю часть метантенка осуществляют непрерывно или порционно.

Недостатком процесса сбраживания является очень медленное разложение органических веществ, сопровождающееся образованием газов, обладающих неприятным запахом. Отсутствие кислорода в септике, где происходит загнивание его содержимого, также является недостатком при отводе сточных вод в водоемы, так как для совершающихся в водоемах процессов самоочищения требуется большое количество кислорода.

1.2.5. Диспоузер [21–23]

Измельчитель пищевых отходов (диспоузер) представляет собой электрическое устройство, которое монтируется прямо под кухонную мойку.

С одной стороны оно подсоединяется к сливному отверстию, с другой — к канализационной трубе. Внутри этого устройства отходы проходят механическую обработку — попадают в измельчающую камеру, на дне которой находится вращающийся со скоростью до 1450 об/мин металлический диск [22]. За счет центробежной силы отходы распределяются по стенкам камеры, на которых находятся специальные самозатачивающиеся терки. Измельчение происходит за счет трения отходов об эти терки.



Рис. 1.8

Диспоузер:

1 — загрузочный патрубок; 2 — крепежный замок; 3 — измельчающая камера; 4 — измельчающее зубчатое кольцо; 5 — патрубок для подключения дополнительной бытовой техники; 6 — измельчающие кулачки; 7 — наружный корпус; 8 — дробильный диск; 9 — электродвигатель.

Кроме этого, на диске находятся специальные свободно вращающиеся кулачки, которые служат для предварительного дробления твердых отходов, а также для растирания отходов о терки на стенках камеры. Измельченные отходы сквозь отверстия в диске смываются водой в канализационную трубу. Размер измельченных частиц не превышает 3–5 мм [23].

Недостатки данного аппарата:

- нежелательно измельчать чрезмерно волокнистые и жилистые продукты — они обволакивают измельчающие элементы, препятствуя их работе;
- нельзя измельчать скорлупу грецких, миндальных орехов, косточки персиков, раковины моллюсков и прочие очень жёсткие отходы;
- недопустимо бросать в измельчитель полиэтилен, целлофан, нитки, волосы, бумагу, дерево, текстиль, жестянки, камни, стекло — это вызывает поломку аппарата;
- нельзя лить в аппарат горячую воду и жир.

1.3. Обзор систем сбора пищевых отходов с целью их последующей утилизации

1.3.1. Организация системы вывоза пищевых отходов [24]

Варианты системы вывоза пищевых отходов:

- прямой вывоз собирающими мусоровозами;
- двухэтапный вывоз с промежуточной перегрузкой на станции.

1.3.1.1. Прямой вывоз отходов [25]

Прямой вывоз отходов собирающими мусоровозами (с объемом кузова 12–18 м³) применим только в том случае, если расстояние до объекта захоронения не более 15–17 км, в противном случае их использование становится экономически нецелесообразным. Подбор транспорта для вывоза пищевых отходов во многом определяется принятой системой сбора. Кроме того, при подборе оборудования следует учитывать [26]:

- максимально разрешенные нагрузки на дорожное полотно;
- возможность подъезда и разворота техники (ширина улиц, наличие разворотных площадок, мостов, тоннелей, арок и т. п.);
- количество и качество образующихся отходов.

Вывоз отходов с контейнерных площадок осуществляется собирающими мусоровозами. По способу погрузки пищевых отходов из контейнера собирающие мусоровозы делятся на две группы:

- 1) мусоровозы задней загрузки;
- 2) мусоровозы боковой загрузки.

Для обслуживания описанного выше контейнерного парка для сбора пищевых с помощью «евроконтейнеров» или контейнеров типа ГМТ [27] (60–240 л) оптимальным является использование мусоровозов с задней загрузкой, например типа «ротопресс» или «вариопресс».

1.3.1.2. Двухэтапный вывоз с промежуточной перегрузкой [28]

Двухэтапный вывоз с промежуточной перегрузкой на станции применяется при дальности вывоза более 17–25 км.

Доставка пищевых отходов на мусороперегрузочные станции осуществляется малыми собирающими мусоровозами. Вывоз отходов с мусороперегрузочной станции осуществляется мусоровозами со съемными контейнерами 20–30 м³ в уплотненном состоянии.

Устройство мусороперегрузочных станций позволяет:

- снизить временные затраты на сбор и вывоз отходов;
- снизить эксплуатационные затраты на ГСМ и ремонт парка мусоровозов;
- укрупнить объекты переработки;
- накапливать транспортные партии вторичного сырья и компостных фракций на мусороперегрузочной станции;
- производить первичную обработку отходов.

1.3.2. Организация сбора пищевых отходов кухонь, столовых и ветеринарно-санитарный контроль за их использованием при кормлении животных [29]

Важная роль в рациональном и эффективном использовании кормов в подсобных хозяйствах воинских частей отводится правильному сбору и подготовке к скармливанию пищевых отходов. Пищевые отходы собирают в специальную посуду с плотно закрывающейся крышкой. Сбор пищевых отходов начинают с расстановки тары (20–25-литровые бочки). Для сбора жидких и влажных пищевых отходов следует использовать тару из пластмассы или других нержавеющих материалов.

Тару, предназначенную для сбора пищевых отходов, использовать для каких-либо других целей использовать запрещается. Ежедневно, после опорожнения её от жидких (или влажных) пищевых отходов она подлежит тщательной промывке горячей водой с применением моющих средств и периодически — дезинфекции [30] (1,5–2%-ным раствором кальцинированной соды, или 2%-ным раствором едкого натра, или раствором хлорной извести, содержащим 2% активного хлора). После дезинфекции тару промывают водой.

Для временного хранения собранных пищевых отходов (до вывоза их в хозяйство) домоуправления по согласованию с местными органами санитарно-эпидемиологической службы оборудуют специальные площадки с твёрдым (асфальтированным или цементным) покрытием и с бортами высотой 10–12 см, препятствующими стоку жидкости. На площадках устанавливают лари, контейнеры или деревянные ящики с закрывающимися крышками.

Хранить неконсервированные влажные пищевые отходы разрешается летом не более 8–10 часов с момента их сбора, а осенью и зимой при температуре наружного воздуха не выше 6–7°C — не более 30 часов [31].

Транспортировка пищевых отходов осуществляется согласно Санитарным правилам [32]. Вывозят пищевые отходы подсобные хозяйства специально оборудованным транспортом воинских частей или специальными автомобилями, находящимися в ведении жилищных контор. Перевозка пищевых отходов с мест их сбора в хозяйство разрешается только в специально оборудованных на автомобилях ёмкостях или в контейнерах.

Все поступившие в хозяйство пищевые отходы, кроме мельничных, подлежат стерилизации путём проварки в закрытых варочных котлах в течение не менее одного часа при температуре не ниже 100°C при давлении пара 1–1,5 атм и дальнейшей обработке согласно установленному технологическому режиму приготовления кормов. Котлы должны быть снабжены контрольно-измерительными приборами для определения температуры и давления [32].

1.4. Эффективность организационно-технических систем сбора и переработки пищевых отходов

В работе [33] были проанализированы следующие пять систем:

- коммунальные системы измельчения пищевых отходов, как часть территориальных канализационных и очистных сооружений (ИПО/ГОС);
- муниципальные службы по сбору и утилизации твердых отходов путем их захоронения на полигонах;
- муниципальные службы по сбору и компостированию твердого мусора;
- муниципальные службы по сбору твердых отходов и их переработке для извлечения энергии (сжигание);
- коммунальные системы измельчения пищевых отходов как часть системы контейнерного удаления сбрасываемых отходов из мест образования.

Анализ эффективности первых четырех систем основывается на анализе работы действующих систем в городах. Система по удалению сбрасываемых отходов из мест образования оценивалась по эффективности сбора в контейнеры разного размера и увеличению полей фильтрационных карт на 25% [34] с целью размещения там измельчителя пищевых отходов.

Что касается эксплуатационных затрат, то действующие системы классифицируются следующим образом (от наименьшего к наибольшему) [35]:

- муниципальные системы по сбору и утилизации твердых отходов путем их захоронения на полигонах;
- муниципальные системы по сбору и компостированию твердого мусора;
- коммунальные системы измельчения пищевых отходов как часть территориальных канализационных и очистных сооружений (ИПО/ГОС);
- муниципальные системы по сбору твердых отходов и их переработке для извлечения энергии (сжигание);
- коммунальные системы измельчения пищевых отходов как часть системы контейнерного удаления сбраживаемых отходов из мест образования.

Обычно 75% пищевых отходов может быть переработано с помощью измельчителей пищевых отходов [36]. В настоящее время пищевые отходы в 37% домашних хозяйств России перерабатываются через очистные сооружения. Пищевые отходы состоят преимущественно на 70% из воды, следовательно, водоочистные сооружения — это более естественный способ транспортировки подобных отходов [37].

Чем больше биологических твердых веществ поступает в водоочистные сооружения, тем выше количество питательных веществ, азота и фосфора ассимилируется в биомассе [38], которая в качестве ила удаляется из сточных вод [39].

Когда биологические твердые вещества из городских водоочистных сооружений или осадок септиктанка, переработанный через водоочистные сооружения, вводятся в почву, то это можно назвать самым приемлемым способом рециклирования [40].

Как показано в работах [41, 33], с экологической точки зрения измельчители в системе городских очистных сооружений — это наиболее рациональный способ утилизации пищевых отходов, который может быть использован в качестве механизма для начального разделения твердых от пищевых отходов. Также стоит отметить, что в настоящее время транспортировка пищевых отходов на свалки составляет 72% от общей стоимости вывоза ТБО, тогда как они могли бы быть полностью переработаны в системе канализации и очистки хозяйственно-бытовых стоков при затратах, в 150–180 раз меньших.

Исследование последствий внедрения измельчителей пищевых отходов в канализационную систему приведено в работе [42]. На основании результатов, представленных в данной работе, можно сделать вывод:

1) влияние измельчителей на гидродинамику канализационных систем и водоочистных сооружений минимально;

2) негативное экологическое воздействие измельчителей на состояние окружающей среды незначительно;

3) использование измельчителей не приводит к увеличению гидравлического сопротивления канализационной системы;

4) при внедрении измельчителей пищевых отходов в канализационную систему увеличения концентрации вредных примесей не наблюдается;

5) при внедрении измельчителей пищевых отходов наблюдается увеличение на 2,5–5% концентрации примесей в сгустителе осадка сточных вод.

Очевидно, что наличие пищевых отходов в составе ТБО осложняет технологический процесс сбора и рециклинга коммерчески значимых фракций. Решение этой проблемы лежит в организации селективного сбора отходов, а одной из перспективных технологий селективного удаления пищевых отходов из ТБО является измельчение пищевых отходов в местах их образования до дисперсности, соответствующей требованиям канализационных сетей. Такая технология отличается экологической безопасностью, универсальностью, а также экономичностью по сравнению с вывозом пищевых отходов в общем потоке ТБО.

Глава 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ПУЛЬПОВОЙ ПЕРЕРАБОТКИ И УДАЛЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ОТХОДОВ ИЗ МЕСТ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

2.1. Характеристики стенда и методики исследований технологического процесса пульповой переработки пищевых отходов

Для анализа эффективности конструкций измельчителей пищевых отходов был спроектирован и изготовлен лабораторный стенд [43] (рис. 2.1), включающий в себя макет измельчителя пищевых отходов [44] (рис. 2.2), установленный под типовой бытовой мойкой, снабженной смесителем для подачи воды, и соединенный с бытовой канализационной сетью для удаления измельченных пищевых отходов по отводящему каналу, и пусковое устройство для включения и выключения аппарата.

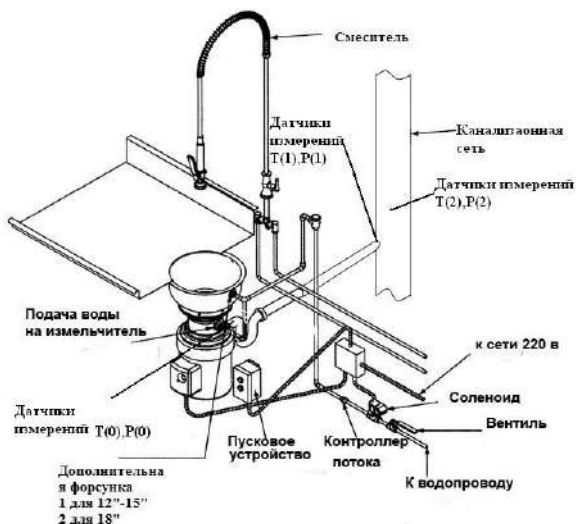


Рис. 2.1

Схема экспериментального стенда для исследования эффективности конструкций измельчителей пищевых отходов



Рис. 2.2

Серийный диспозер фирмы IN-SINK-ERATOR:

1 — входной патрубок; 2 — крепление диспозера; 3 — рабочая камера; 4 — самозатачивающиеся терки; 5 — перфорированный диск; 6 — дробящие кулачки; 7 — выходной патрубок; 8 — патрубок подвода воды; 9 — пневмокнопка; 10 — корпус аппарата.

Все экспериментальные исследования проводились с реальными пищевыми отходами из состава ТБО города Москвы [102] (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Фракционный состав пищевых отходов [102]

Картофель и его очистки	31%
Другие овощи	25%
Фрукты	25%
Мясо, колбасы	0,5%
Мясные кости	3%
Рыба, рыбные кости	2%
Хлеб и хлебобродуки	2%
Молочные продукты	0,5%
Яичная скорлупа	0,5%
Прочие (непищевые) отходы, упаковка	5%

Исследования на лабораторном стенде осуществлялись следующим образом. Пуск измельчителя осуществляется нажатием пневмокнопки. В процессе контрольных исследований были проведены эксперименты с серийным измельчителем-диспоузером (рис. 2.2) фирмы IN-SINK-ERATOR. Как видно из рисунка 2.2, пищевые отходы подают в измельчающую камеру, на дне которой закреплен горизонтально вращающийся со скоростью до 1450 об/мин металлический диск. За счет центробежной силы отходы распределяются по стенкам камеры, на которых находятся специальные самозатачивающиеся терки. Измельчение происходит за счет трения отходов об эти терки. Кроме этого, на диске находятся специальные свободно вращающиеся кулачки, которые служат для предварительного дробления твердых отходов, а также для растирания отходов о терки на стенках камеры. Измельченные до состояния пульпы пищевые отходы сквозь отверстия в диске смываются водой к выходному патрубку и далее в канализационную трубу. Размер измельченных частиц не превышает 2–5 мм [84].

2.2. Описание используемого исследовательского оборудования

Образующая в ходе эксперимента пульпа была проанализирована на жидкостном хроматографе «Милюхром-6» с целью определения ее элементного состава.

Исследования на жидкостном хроматографе проводились следующим образом. Измерения проводились на хроматографе с изократическим способом вымывания вещества, в нём компоненты исследуемой среды сначала подаются насосом через фильтр в систему ввода образца, а затем туда же вводится проба. Исследуемая среда из резервуара через дегазатор попадает в колонку предварительного насыщения, затем в разделительную камеру и в детектор.

Важнейшие характеристики хроматограммы — время удержания t_r и связанный с ней удерживаемый объем [46] — отражают природу веществ, их способность к сорбции на материале неподвижной фазы и, следовательно, при постоянстве условий хроматографирования являются средством идентификации вещества. Для данной колонки с определенными скоростями потока и температурой время удерживания каждого соединения постоянно (рис. 2.3).

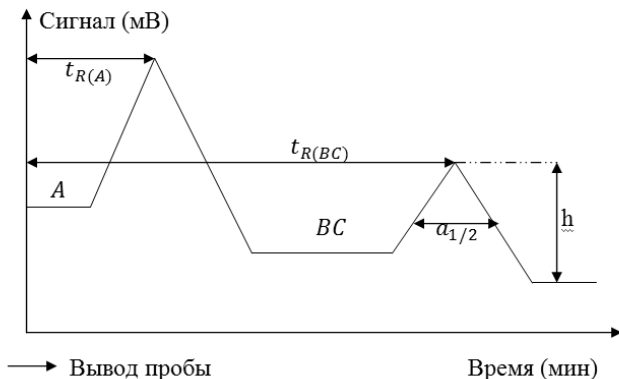


Рис. 2.3

Параметры хроматограммы:

$t_{R(a)}$ — время удерживания компонента A анализируемой смеси с момента ввода в колонку до появления на выходе из колонки максимума пика; $t_{R(BC)}$ — время удерживания внутреннего стандарта (первоначально отсутствующее в анализируемой смеси вещество); h — высота пика (мм); $a_{1/2}$ — ширина пика на половине его высоты, мм.

Для идентификации вещества по хроматограмме были использованы стандартные образцы. Из сравнения времени удержания неизвестного компонента $t_{R\chi}$ со временем удержания t_{RCT} известных веществ был получен химический состав пульпы (табл. 2.2):

$$t_{R(\text{отн})} = \frac{t_{R(A)}}{t_{R(BC)}}. \quad (2.1)$$

Таблица 2.2

Химический состав пульпы

Показатель	Вещество	Величина
Элементный состав на рабочую массу, %	Углерод	17–20
	Водород	2–3
	Кислород	13–17
	Азот	0,5–1
	Сера	0,1–0,12
Общие свойства	Зольность на рабочую массу, %	10–16
	Зольность на сухую массу, %	20–32
	Органическое вещество на сухую массу, %	68–80
	Влажность, %	45–55

Показатель	Вещество	Величина
Общие свойства	Плотность, кг/м ³	190–200
	Теплота сгорания низшая на рабочую массу, кДж/кг	5000–6000
Агрохимические показатели на сухую массу, %	Азот общий N	0,8–1
	Фосфор P ₂ O ₅	0,7–1,1
	Калий K ₂ O	0,5–0,7
	Кальций CaO	2,3–3,6

Для проверки данных, полученных в ходе качественного анализа химического состава пульпы, был использован метод внутренней нормализации [48]. Данный метод основан на приведении к 100% суммы площадей всех пиков на хроматограмме. Расчет массовой доли в % одного компонента проводят по формуле [49]:

$$\omega_{(a)} \% = \frac{K_A S_A}{K_A S_A + K_B S_B + \dots K_i S_i}, \quad (2.2)$$

где K — поправочные коэффициенты; S_A , S_B , S_i — площади пиков компонентов смеси.

Так как этот метод внутренней нормализации дает информацию только об относительном содержании компонента в смеси, но не позволяет определить его абсолютную величину, в работе также был использован метод внутреннего стандарта [50]. Данный метод основан на сравнении выбранного параметра пика анализируемого вещества с тем же параметром стандартного вещества, введенного в пробу в известном количестве.

В исследуемую пробу вводилось известное количество стандартного вещества, пик которого достаточно хорошо отделяется от пиков компонентов исследуемой смеси. Проводя анализ пробы с внутренним стандартом, также необходимо рассчитать количество определяемого вещества. Для этого используется следующая формула [51]:

$$g_{(A)} = \frac{k_{(A)} h_{(A)}}{K_{(BC)} h_{(BC)}}, \quad (2.3)$$

где $g_{(A)}$ — количество определяемого компонента A ; $h_{(A)}$ — высота пика компонента A ; $h_{(BC)}$ — высота пика внутреннего стандарта; $k_{(A)}$, $K_{(BC)}$ — поправочные коэффициенты.

2.3. Результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований свойств пульпы

Анализ результатов, полученных при использовании разных методик проведения эксперимента, позволил определить элементарный состав смеси, который приведен в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Состав смеси по содержанию элементов

Название вещества	Содержание, %
Азот аммонийный	1,2
Азот нитратный	0,05
Азот общий	3,8
Вещество органическое	25,55
Вода	30,6
Железо	2,9
Калий обменный	0,9
Калий общий	1,2
Кобальт	0,3
Марганец	5,8
Медь	4,6
Углерод органический	13,3
Фосфор общий	3,5
Фосфор подвижный	0,6
Цинк	5,72

По результатам исследований свойств пульпы (рис. 2.4 и табл. 2.1–2.3) было установлено, что пульпа соответствует техническим условиям для приема сточных вод в систему канализации города Москвы [52].

В экспериментах на стенде было исследовано влияние диаметра и формы отводящего канала от измельчителя пищевых отходов к канализационной сети на расходные и гидравлические характеристики измельчителя.

Прежде всего было произведено сравнение указанных характеристик для конструкций отводящих каналов, выполненных в соответствии с [53] (рис. 2.4):

- гладкий канал;
- канал с мелкой гофрой (высота 2 мм);
- канал с средней гофрой (высота 4 мм);
- канал с крупной гофрой (высота 6 мм).

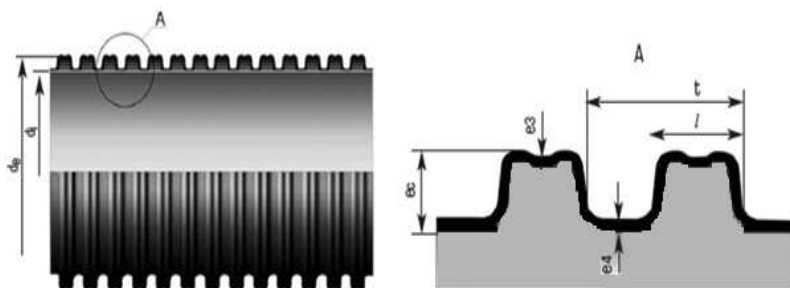


Рис. 2.4

Конструкция гофрированной трубы:

d_e — наружный диаметр; d_i — внутренний диаметр; e_c — высота гофра; e_3 — толщина стенки гофра; e_4 — толщина стенки; t — шаг гофра; l — ширина выступа гофра.

Таблица 2.4

Характеристики исследуемых каналов

Номинальный наружный диаметр d_n , мм	Внутренний диаметр d_i , мм	Высота гофра e_c (не менее), мм	Толщина стенки гофра e_3 , мм		Толщина стенки e_4 (не менее), мм	Шаг гофра t , мм	Ширина выступа гофра l , мм
			SN6	SN8			
110	91	8.7	0,45	0,5	1	12,6	8,6
160	139	10	0,6	0,7	1	12,6	9
200	176	13	0,6	0,7	1,4	16,5	12

Для определения зависимости расхода воды через измельчитель от диаметра выпускного канала использовался расходомер переменного давления [54]. Принцип действия расходомеров данного типа основан на измерении перепада давления, образующегося в результате местного изменения скорости потока жидкости. На рисунке 2.5 показана форма потока жидкости, протекающей через диафрагму. Выделив в трубопроводе два сечения: I—I — перед сужающим устройством там, где поток еще не меняет своей конфигурации, и II—II — в месте наибольшего сжатия потока, находящемся на некотором расстоянии от внешнего (по ходу потока) торца диафрагмы.

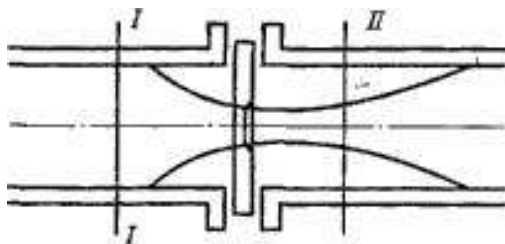


Рис. 2.5

Форма потока жидкости, протекающей через диафрагму

При этом расход для несжимаемых жидкостей находится по формулам [55]:

$$Q = \alpha \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)}, \quad \text{кг/м}^3, \quad (2.4)$$

где ρ — плотность вещества, кг/м^3 ; S_0 — площадь поперечного сечения отверстия диафрагмы (сужающее устройство); Q — расход вещества; p_1 — абсолютное давление до сужающего устройства; p_2 — абсолютное давление после сужающего устройства;

$$\alpha = \frac{\mu \cdot \sqrt{\Psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 \cdot m^2 \cdot \mu^2}} \quad (2.5)$$

— коэффициент расхода, учитывает неравномерное распределение скоростей по сечению потока, обусловленное вязкостью вещества и трением о стенки трубопровода. Этот коэффициент для разных сужающих устройств определяется опытным путём.

Здесь $\mu = \frac{S_2}{S_0}$ — коэффициент сужения струи (S_2 — площадь поперечного сечения наиболее суженного участка струи), k_1 , k_2 — поправочные коэффициенты на неравномерность распределения скоростей в сечениях I и II; $m = \frac{v_1}{v_0}$ (v_1 — средняя скорость вещества в сечении I, v_0 — средняя скорость вещества в отверстии диафрагмы); ξ — местное сопротивление потоку.

Для исследования гидравлического сопротивления отводящего канала был проведен ряд экспериментов по определению перепада давления с помощью U-образного манометра [56] (рис. 2.6).

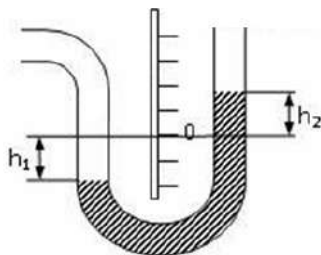


Рис. 2.6

Схема U-образного манометра

В данной работе для исследования перепада давления в отводящем канале от диспозера к домашней канализационной сети был взят жидкостной U-образный манометр типа М (ГРСИ № 1846-93) с пределом измерений 0–100 мм. Погрешность отсчета показаний составляет ± 1 мм высоты столба затворной жидкости.

Также был проведён эксперимент по определению количества сероводорода, проникающего в помещения из канализационной сети, при использовании прямого отводящего канала и S-образного. Эксперимент проводился на электрохимическом газоанализаторе [57] (рис. 2.7).

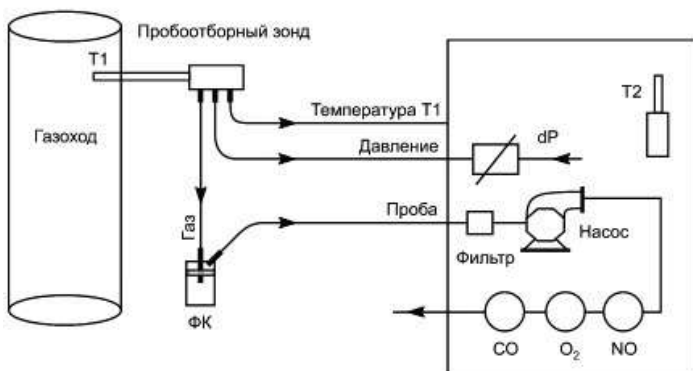


Рис. 2.7

Схема газоанализатора:

ФК — фильтр грубой очистки с конденсатосборником; CO, NO, O₂ — электрохимические датчики для измерения концентрации кислорода, оксидов углерода и азота; dP — датчик давления; T1, T2 — датчики температуры.

Работа с прибором осуществлялась следующим образом. Проба анализируемого газа насосом прокачивалась через фильтры и поступала в систему последовательно расположенных электрохимических датчиков. Электрические сигналы от датчиков преобразуются электронным модулем газоанализатора и в алфавитно-цифровом виде отображаются на дисплее прибора.

Также одной из важных характеристик исследуемого процесса является определение расхода воды, требуемой для нормальной работы измельчителя. Для измерения расхода жидкости был использован расходомер типа LSZ-23. Действие этих расходомеров [59] основано на возникновении перепада давлений на сужающем устройстве (рис. 2.8) в трубопроводе при движении через него потока жидкости. При изменении расхода Q величина этого перепада давлений p также изменяется.

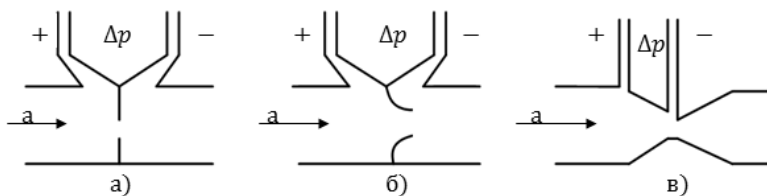


Рис. 2.8

Сужающее устройство трубопровода

Сужающее устройство расходомера переменного перепада давлений является первичным преобразователем, в котором расход преобразуется в перепад давлений. Особенностью первичных преобразователей расходомеров переменного перепада давлений является квадратичная зависимость перепада давлений от величины расхода. Чтобы показания измерительного прибора расходомера линейно зависели от расхода, в измерительную цепь расходомеров переменного перепада давлений вводят линеаризующий преобразователь. Таким преобразователем служит, например, блок линеаризации в промежуточном преобразователе НП-ПЗ [60].

Помимо количества воды в пульпе на образование настывлей влияет распределение крупности частиц. Определение крупности частиц также является параметром, характеризующим допустимость сброса пульпы в городскую канализационную сеть [61].

Для определения данного параметра исследуемая пульпа была подвергнута сушке в сушильном шкафу [62] — камере с регулируе-

мым подогревом, предназначенной для испарения влаги из веществ при температуре 40–200°C, а затем было произведено распределение крупности частиц. Определение крупности частиц производилось на вибросите [63] (рис. 2.9).

Принцип работы вибросита заключается в использовании центробежной силы и гасителя колебаний, которые отвечают рабочим требованиям. Особенностью работы вибрационных сит является характер колебаний просеивающих поверхностей. В отличие от других вибрационных конструкций в ситах применяется пространственная (трехкомпонентная) вибрация просеивающих поверхностей.

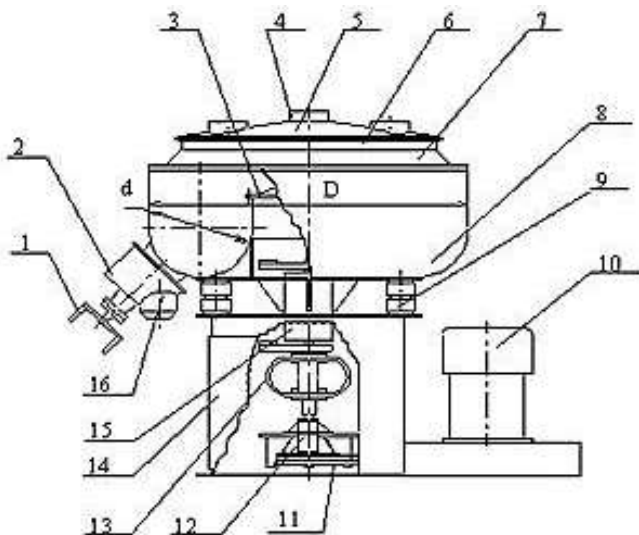


Рис. 2.9

Схема устройства вибросита:

1 — рукоятка; 2 — клапан разгрузки; 3 — крышка; 4 — патрубок загрузки; 5 — крышка рукоятки; 6 — хомут; 7 — крышка; 8 — камера; 9 — виброизоляция; 10 — двигатель; 11 — передача клиноременная; 12 — опора промежуточная; 13 — муфта; 14 — рама; 15 — вибровозбудитель; 16 — патрубок разгрузки.

Подобный характер колебаний обеспечивает непрерывное изменение по величине и направлению инерционных нагрузок, что позволяет получить оптимальные условия рассева, особенно для материалов с размерами частиц, близкими к размерам ячейки сетки.

2.4. Результаты экспериментальных исследований потоков пульпы пищевых отходов

Зависимости расхода воды и пульпы пищевых отходов через измельчитель от диаметра выпускного представлены на рисунках 2.10 и 2.11.

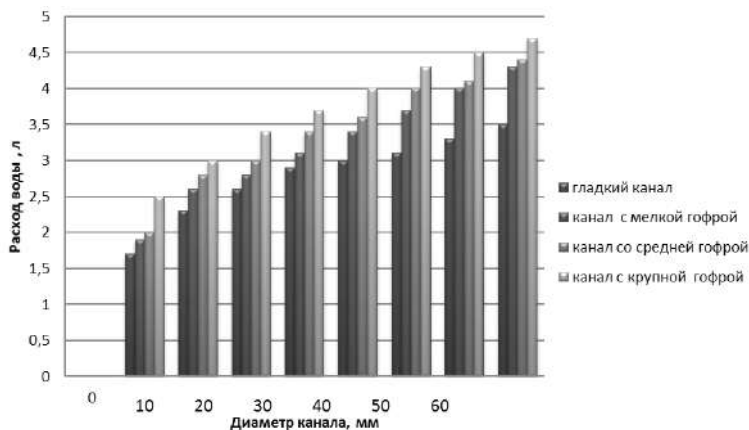


Рис. 2.10

Зависимость расхода воды от диаметра выпускного канала

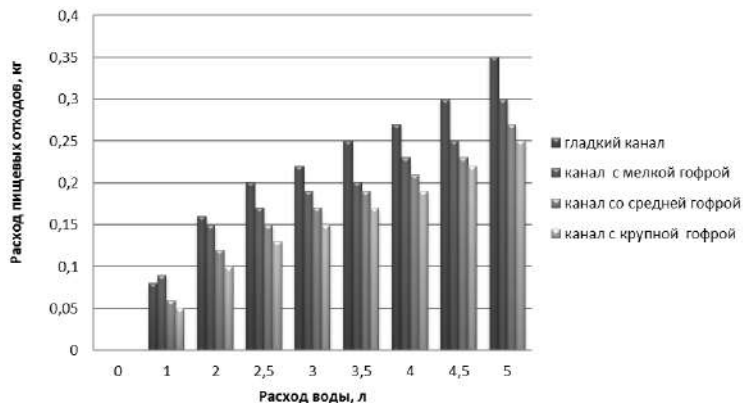


Рис. 2.11

Зависимость расхода пищевых отходов от диаметра выпускного канала

Исходя из диаграмм, представленных на рисунках 2.6 и 2.7, можно сделать вывод, что гладкий канал наиболее пригоден для использования в качестве отводящего канала от диспозуера к домашней канализационной сети. Дальнейшие измерения были выполнены на данном канале.

Давление измерялось в прямолинейном и криволинейном канале. Измерения проводились по 10 раз для каждого процентного соотношения воды и дробленых пищевых отходов и усреднялись. В ходе эксперимента были получены следующие результаты, приведенные на рисунке 2.12.

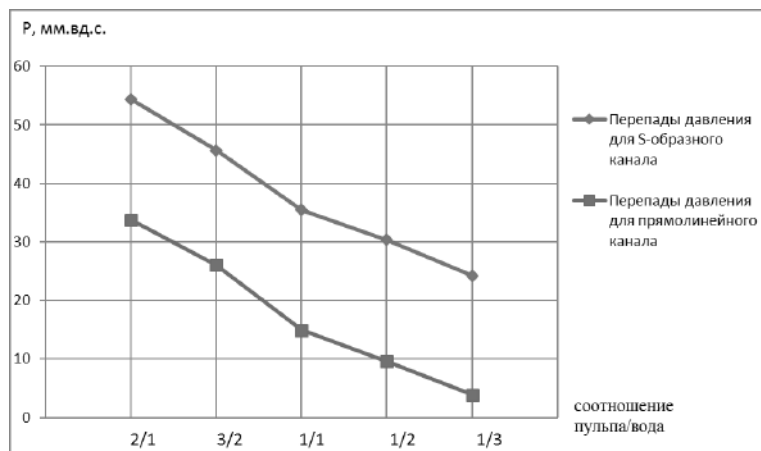


Рис. 2.12

Перепады давления для различных соотношений пульпы/вода

Результаты эксперимента по определению количества сероводорода в помещении при использовании прямого отводящего канала и S-образного представлены на рисунке 2.13.

Данный эксперимент проводился с целью обоснования безопасности использования выбранной формы канала, так как сероводород относится ко 2-му классу опасности. ПДК сероводорода в воздухе населенных пунктов составляет $0,008 \text{ мг/м}^3$ [58].

Определение расхода воды проводилось в зависимости от соотношения количества дроблёных пищевых отходов к количеству воды. Были рассмотрены следующие соотношения дробленых пищевых отходов к воде: 2/1; 2/3; 1/1; 1/2; 1/3. Измерения проводились по 10 раз

для каждого соотношения. По среднему значению для каждого соотношения построена диаграмма расхода воды (рис. 2.14).

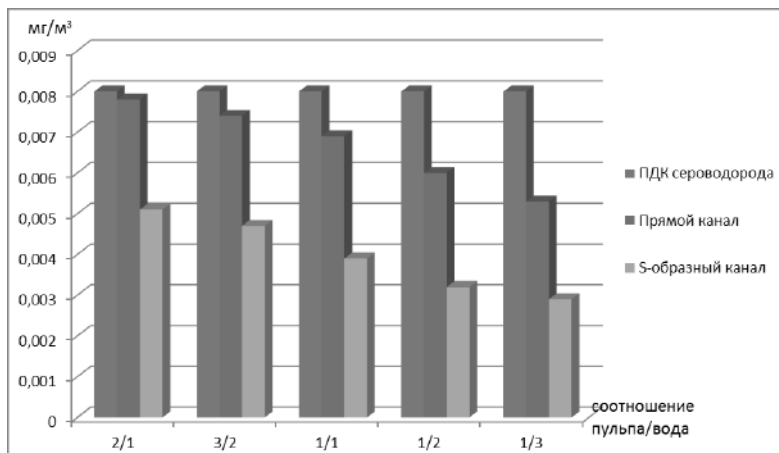


Рис. 2.13

Количество выделяемого H_2S для отводящих каналов

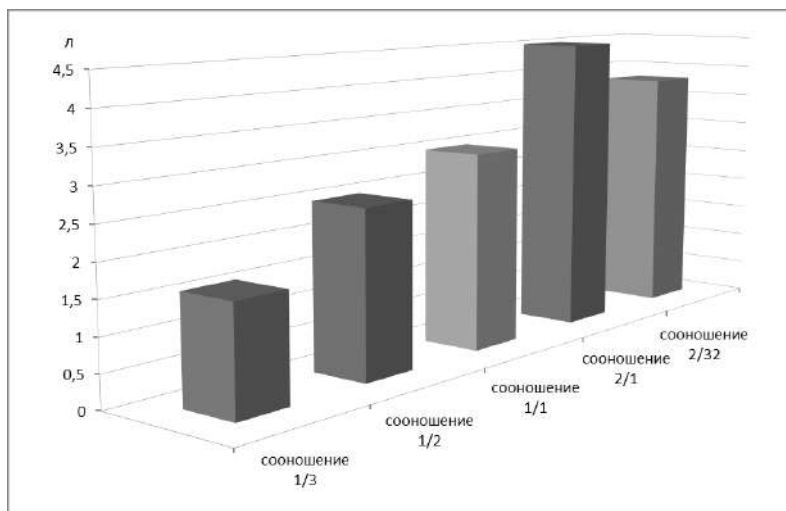


Рис. 2.14

Определение расхода воды и частиц для пульпы смешанных пищевых отходов

Сопоставив полученные результаты, приведенные на рисунке 2.14, с энергетическими затратами, можно сделать вывод о том, что наилучшее соотношение расходов дробленых пищевых отходов и воды составляет 1/1.

При данном соотношении затраты воды на один пуск диспозера составляют ≈ 3 литра, не происходит образование настывей (нарос-тов в форме бугра на поверхности труб) в отводящих трубопроводах от диспозера к домашней канализационной сети, а также энергоза-траты при работе аппарата в таких условиях незначительны.

Результаты, полученные на данном аппарате, представлены на рисунке 2.15.

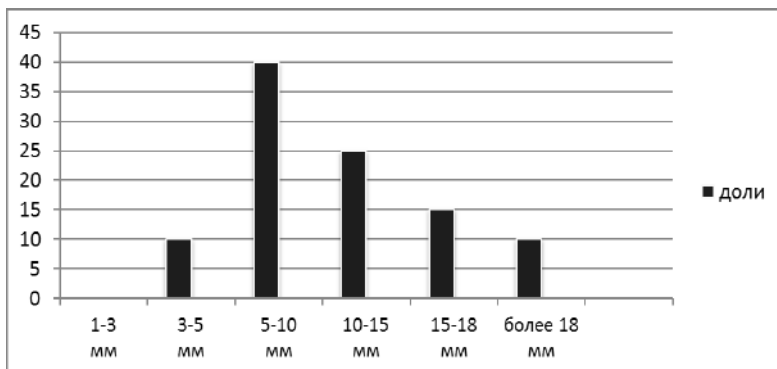


Рис. 2.15

Усредненное распределение крупности частиц для пульпы смешанных пищевых отходов

На рисунке 2.15 представлены результаты распределения крупности фракций смешанных пищевых отходов в процентном соотношении в соответствии с таблицей 2.1.

2.5. Результаты расчетно-теоретических исследований потоков пульпы

Многообразие вариантов применения измельчителей пищевых отходов в городском хозяйстве при внедрении их в практику требует либо проведения обширных экспериментальных исследований для каждого типа образований отходов, либо построения расчетно-теоретической модели, инвариантной по отношению к условиям внедрения. Подобные модели для системы с подвижной твердой фазой

рассматривались применительно к задаче переноса дисперсных материалов в потоке газа [64], а также в задачах реологии при изучении движения суспензий [65]. Задача моделирования движения твёрдых частиц в жидкости встречается при седиментации частиц в процессах обогащения продуктов химической технологии [66]. Разработана математическая модель газовой адсорбции с учётом протекающих химических реакций в пульпе [67]. Математические модели, описывающие системы «жидкость — твёрдые частицы» с подвижной твёрдой фазой, могут быть использованы в задачах моделирования движения пульп в аппаратах химической технологии.

Задача численного моделирования движения твёрдых частиц в жидкости нетривиальна и требует учёта большого числа факторов, особенно в случае трёхмерной постановки задачи и при высокой концентрации твёрдой фазы. В последнее время для решения комплексных задач гидродинамики, включающих в себя учёт взаимодействия одновременно нескольких фаз, применяются современные численные методы наподобие метода решёточных уравнений Больцмана [68]. Данный метод позволяет разрабатывать эффективные параллельные алгоритмы, что даёт возможность построения трёхмерных математических моделей движения высоконасыщенных суспензий с возможностью проведения вычислений на обычных персональных компьютерах. Ввиду того, что в основе метода Больцмана лежит математический аппарат клеточных автоматов, становится возможным упрощение описания граничных условий, что особенно актуально в случае изучения высококонцентрированных многокомпонентных смесей. Метод Больцмана был успешно применён при моделировании движения суспензий [69]. Следует отметить, что вопрос об особенностях гидродинамики высоконасыщенных пульповых потоков остаётся малоизученным.

Лэдд [75] впервые применил метод решёточных уравнений Больцмана для изучения суспензий твердых частиц в однофазной жидкости. На данный момент доступно несколько вариаций оригинального алгоритма. В большинстве реализаций данного метода частицы имеют сферическую форму. Модель хранит данные о расположении каждой частицы, их радиусе, линейных и угловых скоростях. Для реализации возможности взаимодействия между частицами вводится специальная область на границе частиц и жидкости. При движении частиц состояние пограничного слоя обновляется на каждой итерации. Узлам сетки, описывающим жидкую фазу, присваивается плотность жидкости. Скорость жидкости первоначально равна нулю во

всех узлах. Процесс моделирования представляет собой итеративный процесс. Каждый шаг итерации может рассматриваться как совокупность выполнения ряда условий. В первую очередь учитываются изменения положения частиц, которые происходят под действием сил и моментов вращения, воздействующих на каждую частицу. Проводится расчёт сил и моментов в связи с изменением представления частиц. Далее рассчитывается функция равновесных распределений. Применяются граничные условия при взаимодействии частиц и жидкости со стенками канала, а также при взаимодействии частиц друг с другом в процессе движения. На завершающем этапе производится перерасчёт силы и момента для каждой частицы и обновляются макроскопические переменные плотности и скорости в жидкой фазе.

При движении частица может быть не точечной и занимать несколько узлов, которые раньше были узлами жидкой фазы. В таком случае импульс на этих узлах передается частице. Если представление частицы на решетке не меняется, силы и моменты в этом случае равны нулю. Скорость жидкости внутри каждой частицы устанавливается равной нулю, чтобы соответствовать движению твердого тела как единого целого.

Несмотря на то что частицы перемещаются и вращаются в жидкости, сила или момент, действующие со стороны жидкости на частицу, могут не влиять на динамику частиц. В связи с этим необходима верификация модели. В тестовой задаче частица имеет плотность жидкости, также частице задаётся начальная угловая скорость. Результирующий момент силы, действующий на жидкость, может оказывать воздействие на динамику вращения. Так как частицы круглые, вращение не изменяет представление частицы в модели. В таком случае угловая скорость плавно уменьшается до тех пор, пока частицы не перестанут вращаться. Если используется явная схема расчета, динамика вращения очень чувствительна к плотности частицы. При малых значениях плотности частиц возникают сильные колебания крутящего момента, действующего со стороны жидкости, что приводит к неустойчивости расчётной схемы. Решением является задание значения плотности частиц, превосходящих плотность жидкости.

Существуют различные подходы для представления потоков жидкости с подвижной твёрдой фазой. Простейший анализ скорости распространения и осаждения частиц течения выполняется с помощью создания блочной модели потока, которая предполагает, что в любой конкретный момент времени не происходит горизонтальных

изменений свойств в его пределах. При таком подходе поток рассматривается как серия идентичных прямоугольных блоков. Основным преимуществом подобного подхода является то, что он позволяет использовать трехмерную модель раствора, которую, кроме того, можно представить в аналитическом виде. Более точное представление о потоке можно получить при учёте горизонтальных колебаний, но при этом, для упрощения модели, не учитывать горизонтальные. Вертикальные ускорения в потоке не учитываются. Справедливость этого подхода выполняется при следующих условиях: горизонтальная протяженность потока должна быть намного больше его толщины (по вертикали).

В качестве практического применения модели движения твёрдых частиц в жидкости было проведено численное и экспериментальное изучение гидродинамики суспензий различной концентрации для определения коэффициентов гидравлического сопротивления и характерных профилей скоростей при движении суспензий в зависимости от концентрации твёрдой фазы и числа Рейнольдса. В рамках экспериментального исследования рассматривалась пульпа на выходе измельчителя пищевых отходов (диспоузера) (параграф 2.3).

В задаче моделирования потока пульпы рассмотрен трёхмерный случай движения воды и монодисперсной среды, состоящей из твёрдых недеформируемых частиц сферической формы. Расчётная модель основана на методе решёточных уравнений Больцмана. Идея метода состоит в представлении жидкости как потока псевдочастиц [70]. Каждая частица имеет дискретное распределение скоростей. В процессе моделирования производится расчёт движения и столкновения частиц. В расчётах была использована модель скоростей D3Q19, представляющая дискретное распределение скоростей частицы с помощью 19 векторов скоростей в 3 пространственных измерениях (рис. 2.16).

В основе метода Больцмана лежит дискретное кинетическое уравнение, которое описывает процесс движения и столкновения между частицами:

$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\vec{x}, t) + \Omega_i(f(\vec{x}, t)), \quad i = 0, 1 \dots N-1, \quad (2.6)$$

где f_i — функция дискретного распределения по каждому направлению i в модели D3Q19; Δt — дискретный шаг по времени; \vec{e}_i — единичный вектор скоростей; Ω_i — оператор столкновений, имеющий следующий вид:

$$\Omega_i = (1/\tau) \cdot (f_i^{eq} - f_i), \quad (2.7)$$

где f_i^{eq} — равновесная функция распределения; τ — время релаксации.

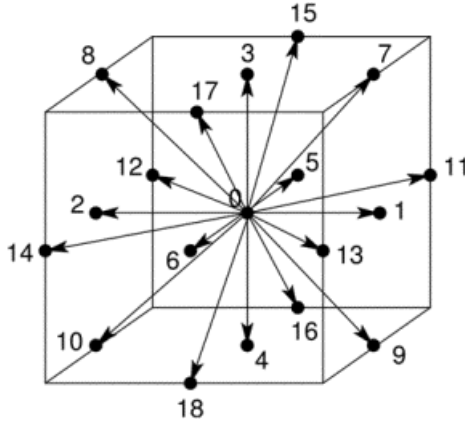


Рис. 2.16

Модель частицы D3Q19

Равновесная функция распределения для малых чисел Рейнольдса [3] записывается в упрощённой форме:

$$f_i^{neq} = \omega_i (\rho + j \cdot c_i / c_s^2), \quad (2.8)$$

где ω_i — весовой коэффициент по направлению i ; ρ — плотность несущей среды; c_i — локальная скорость звука в узле, c_s — равновесная скорость звука в среде; j — плотность импульса.

При учёте взаимодействия твёрдых частиц с жидкостью в ламинарном потоке уравнение (2.6) преобразуется к виду

$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = a^{c_i} (\rho(\vec{x}, t) + [(j(\vec{x}, t) + f(\vec{x}, t) \cdot \Delta t) \cdot c_i] / c_s^2). \quad (2.9)$$

Плотность (2.10) и скорость (2.11) для каждого узла рассчитываются независимо друг от друга для каждой итерации, что позволяет проводить расчёты для каждого из узлов параллельно.

$$\rho = \sum_{i=0}^N f_i, \quad (2.10)$$

где ρ — плотность вещества в узле; f_i — функция распределения; N — число дискретных векторов скоростей.

Плотность в узле рассматривается как сумма ансамблей функций распределений.

$$\vec{u} = 1/\rho \cdot \sum_{i=0}^N f_i \vec{e}_i, \quad (2.11)$$

где \vec{u} — вектор скорости в узле; \vec{e}_i — единичный вектор скорости по направлению i .

Вектор скорости в узле определяется как сумма произведений функции распределения на единичный вектор скорости по каждому из направлений в дискретной модели скоростей, делённая на плотность в данном узле.

Целью получения гидродинамических уравнений из уравнения Больцмана является определение локального равновесия. Математически это определяется как локальная функция распределения f^e , такая, что система находится в равновесии, так что компонент, отвечающий за столкновения, нивелируется (2.12).

$$C(f^e, f^e) = 0, \quad (2.12)$$

где индекс e означает равновесие.

Это приводит к так называемому условию детального равновесия:

$$f_1' f_2' = f_1 f_2. \quad (2.13)$$

Из детального баланса не следует, что молекулы находятся в покое, но любое столкновение между частицами сбалансировано идентичной силой, направленной в противоположном направлении. После логарифмирования уравнение примет вид

$$\ln f_1' + \ln f_2' = \ln f_1 + \ln f_2. \quad (2.14)$$

Данное выражение показывает, что величина $\ln f$ является аддитивным инвариантом столкновений, которая представляет собой микроскопическое свойство, которое не изменяется от эффекта столкновений. Последствие этого при термодинамическом равновесии то, что $\ln f$ должно быть функцией динамического инварианта столкновений само по себе. Это приводит к

$$\ln f = A + B_a v_a + 0,5 C v^2, \quad (2.15)$$

где A , B_a , C являются лагранжевыми мультипликаторами, несущими функциональную зависимость на сопряжённых гидродинамических полях ρ , u , E , которые представляют собой плотность, импульс и

энергию. Эти лагранжевы параметры вычисляются наложением этих трёх величин:

$$m \int f \cdot dv = \rho, \quad (2.16)$$

где ρ — плотность жидкости; v — скорость макроскопического потока. Элементарная квадратура гауссовых интегралов даёт равновесное распределение Максвелла — Больцмана.

Модель позволяет произвольным образом задавать размеры частиц, их концентрацию, скорость потока, а также диаметр и длину трубы. Для более точного учёта реальных условий также была реализована возможность учёта полидисперсности среды. Разработанная модель позволяет в том числе проводить численное моделирование суспензий, в которых концентрация частиц превосходит концентрации жидкости.

На входе в расчётную область частицы располагаются случайным образом, при этом частицы не должны перекрывать друг друга. Ввиду вероятностного характера распределения частиц и полидисперсности среды для определения профилей скоростей и перепадов давления зависимости определяются путём проведения серии численных экспериментов и осреднения полученных результатов. В случае высококонцентрированных смесей, когда частицы занимают большую часть расчётной области, частицы располагаются равномерно по всему входному участку.

Расчётная область представляет собой цилиндр длиной 1 м и диаметром 0,03 м. В цилиндре движется пульпа — смесь воды и твёрдых частиц (рис. 2.17). Плотность частиц соответствует плотности воды.

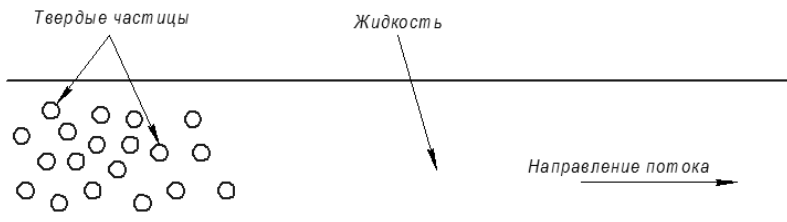


Рис. 2.17

Расчётная область

Вычислительные эксперименты проводились при соотношениях пульпа/вода от 0,3 до 2 с шагом 0,05. Рассматривался случай движения суспензии в виде ламинарного потока при числах Рейнольдса по-

рядка $Re = 120$ и $Re = 900$. На основе экспериментальных данных проведена верификация обеих моделей — монодисперсной и полидисперсной. В случае монодисперсной среды рассматривались частицы одного диаметра. Наиболее близкие к экспериментальным данным результаты получались при диаметре частиц, равным 3,2 мм. В случае полидисперсной модели диаметр частиц задавался случайным образом согласно распределению, полученному по результатам экспериментального исследования.

Получены расчётные зависимости перепада давлений для прямой трубы. В случае модели с монодисперсной средой расчётные зависимости качественно и численно близки к экспериментальным результатам. Для полидисперсной модели зависимость гидравлического сопротивления от соотношения пульпы и воды квазилинейно. При этом общий характер зависимостей при $Re = 120$ (рис. 2.18) и $Re = 900$ (рис. 2.19) одинаков.

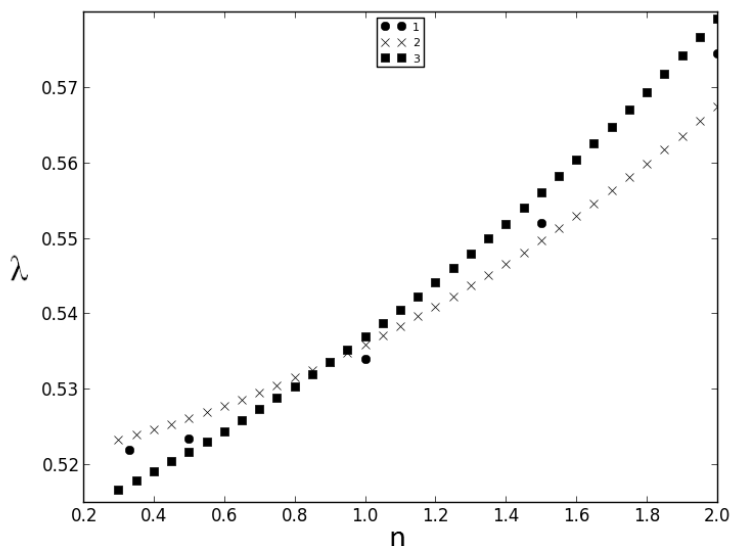


Рис. 2.18

Расчётные и экспериментальные значения перепада давления в трубе при $Re = 120$:

1 — экспериментальные данные; 2 — модель монодисперсной среды;
3 — модель полидисперсной среды.

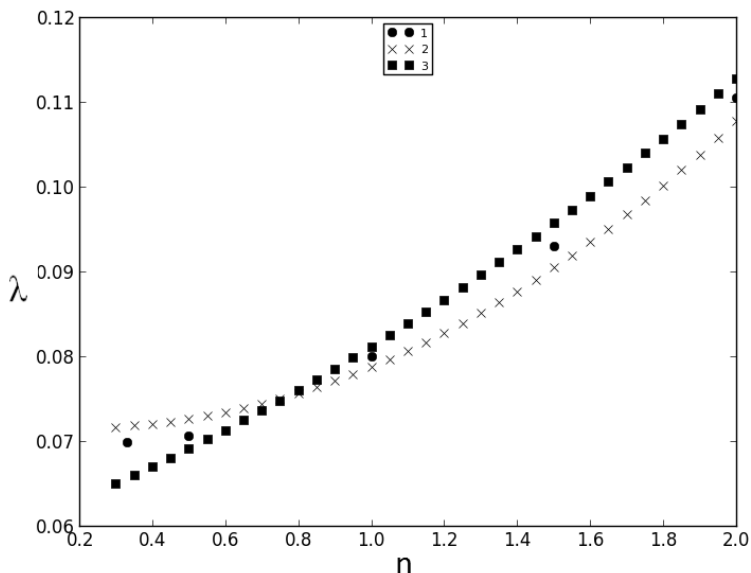


Рис. 2.19

Расчётные и экспериментальные значения перепада давления в трубе при $Re = 900$:

1 — экспериментальные данные; 2 — модель монодисперсной среды; 3 — модель полидисперсной среды.

В расчете получены характерные профили распределения скоростей по сечению от стенки до середины трубы. В качестве эталонного распределения использовались данные по профилю скоростей для случая чистой жидкости. Численное моделирование проводилось при соотношениях пульпа/вода от 0 (случай чистой жидкости) до 2 с шагом 0,1. При $Re = 120$ профиль скоростей для всех исследуемых концентраций идентичен профилю для чистой жидкости (рис. 2.20).

В случае $Re = 900$ распределение не отличается от профиля для чистой жидкости при соотношениях пульпа/вода от 0 до 1,5. Для соотношений пульпа/вода выше 1,5 наблюдается изменение профиля скоростей в сторону турбулизированного профиля течения (рис. 2.21).

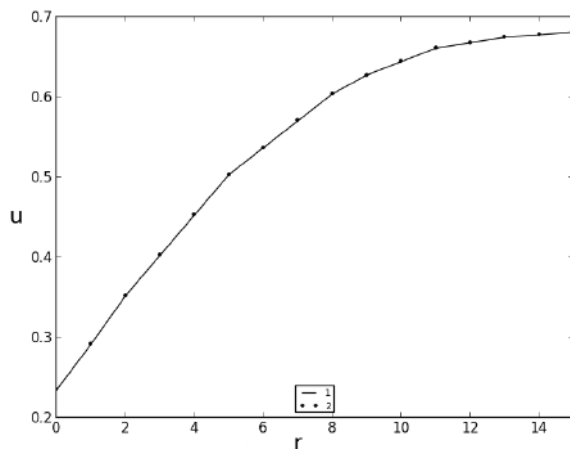


Рис. 2.20

Характерные распределения скоростей по сечению трубы в зависимости от соотношения пульпы/вода в монодисперсной модели при $Re = 120$:

1 — чистая вода; 2 — пульпа/вода при максимальном соотношении 2/1.

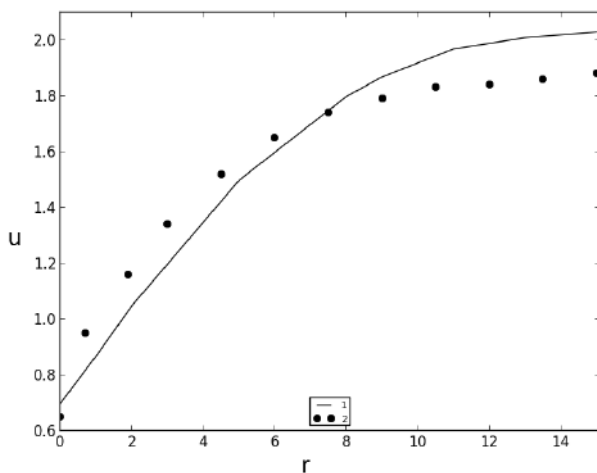


Рис. 2.21

Расчетные распределения скоростей по сечению трубы в зависимости от соотношения пульпы/вода в монодисперсной модели при $Re = 900$:

1 — чистая вода; 2 — пульпа/вода от 1,5 до 2.

На основе полученных данных произведён расчёт коэффициента гидравлического сопротивления для исследуемых чисел Рейнольдса и проведено сравнение со справочными данными для случая течения чистой жидкости по гладкой прямой трубе [71]. Сравнение проводилось для максимальных значений гидравлического сопротивления пульпы (табл. 2.5). Расчётное значение коэффициента составило $\lambda = 0,57$ для $Re = 120$ и $\lambda = 0,108$ для $Re = 900$ соответственно.

Таблица 2.5

Сравнение результатов расчёта со справочными данными

Re	Справочное значение λ	Расчётное значение λ	Расхождение, %
120	0,53	0,57	7,5
900	0,071	0,108	52

Сравнение со справочными данными показало, что для $Re = 120$ коэффициент гидравлического сопротивления отличается незначительно ($\sim 7,5\%$), а в случае $Re = 900$ наблюдается отклонение от эталонного значения в 1,52 раза в большую сторону.

Для проведения вычислительных экспериментов использовался компьютер с центральным процессором Intel Xeon E5-1620 и 32 Гб оперативной памяти под управлением операционной системы Debian Linux. Возможность вычисления параметров каждого узла независимо друг от друга позволяет реализовать компьютерную модель в виде параллельного алгоритма [72]. Основной модуль программы, отвечающий за процесс моделирования, был запрограммирован на языке CUDA C и исполнялся на графическом процессоре NVidia Tesla C2075. Вспомогательные модули программного обеспечения для обработки входных данных о геометрии трубы и граничных условиях, а также обработки и сохранения полученных результатов были реализованы на языке Python и исполнялись на центральном процессоре. Промежуточные результаты расчётов хранились в глобальной памяти графического процессора, что позволило иметь доступ к данным всем вычислительным ядрам. Для хранения локальных переменных с целью повышения скорости вычислений использовались регистры. Результаты моделирования записывались на жёсткий диск в формате VTK, который позволяет произвести дальнейшую обработку данных с помощью специализированных пакетов программного обеспечения.

На основе метода решёточных уравнений Больцмана разработана трёхмерная математическая модель движения смеси твёрдых частиц и жидкости в трубе, включая высококонцентрированные суспензии. Выполнено исследование движения пульпы в трубе при числах Рейнольдса $Re = 120$ и $Re = 900$. Данные по коэффициенту гидравлического сопротивления, полученные при численном моделировании, согласуются с экспериментальными. Сравнение со справочными данными показало, что для $Re = 120$ коэффициент меняется незначительно, а для $Re = 900$ наблюдается существенное увеличение по сравнению с чистой жидкостью. Из полученных результатов следует, что при $Re = 120$ профиль скоростей идентичен случаю чистой жидкости для всего исследуемого диапазона соотношений пульпа/вода. При $Re = 900$ наблюдается турбулизация профиля течения при соотношениях пульпа/вода выше 1,5, что может быть связано с возмущением потока, вызванным столкновениями между частицами.

Ввиду того, что при турбулизации течения наблюдается значительное отклонение значения коэффициента гидравлического сопротивления, такой режим представляет особенный интерес. При турбулизированном течении могут происходить частые столкновения между частицами, особенно в случае высококонцентрированных смесей пищевых отходов, вследствие чего необходимо дальнейшее развитие математической модели для более точного воспроизведения взаимодействий между частицами, включая учёт несферичности частиц, а также возможность их деформации и коагуляции. Рассмотренные подходы находят также применение в предельных случаях, например, когда концентрация пульпы во много раз превосходит концентрацию несущей жидкой фазы, что приводит к засорам канализационных систем. Другим предельным случаем является образование гелей. Гель — специфическая дисперсная система, состоящая из жидкой дисперсионной среды и связанной за счет межмолекулярных сил в местах контакта высокомолекулярной дисперсной фазы. Внешне гель представляется макрооднородной непрерывной средой, однако имеет отличные от нее свойства. Например, на макромасштабах гель является вязко-упругой средой, поскольку проявляет свойства упругости и способен сохранять свою внутреннюю структуру при незначительных механических напряжениях, когда они не превышают межмолекулярные силы сцепления молекул, формирующих дисперсную фазу. При больших напряжениях, когда межмолекулярные связи разрушаются, гель ведет себя как вязкая среда, но способен восстанавливать свою структуру после окончания механического воздействия. При

этом механические свойства геля не остаются постоянными во времени, а могут существенно изменяться за счет внутренних процессов переконденсации и перекристаллизации, приводящих к самопроизвольному уплотнению дисперсной фазы.

В геле находится большое количество химически не связанной с дисперсной фазой жидкости, поскольку массовое содержание структурирующих молекул может составлять от нескольких процентов до долей процента [74, 76]. Эта жидкость заполняет нано- и микроканалы (поры), образованные структурирующими молекулами и их кластерами, она способна удерживаться в геле продолжительное время. Кластеры и каналы имеют статистически сложную и неоднородную внутреннюю микроструктуру: изгибаются, разветвляются, пересекаются, соединяются и т. д. Наличие нано- и микроканалов делает гели незаменимым инструментом для использования в производстве катализаторов, сорбентов, мембранных фильтров, специальных буровых растворов, косметических и фармацевтических препаратов, сред для выращивания биологических субстанций. Однако их практическое использование требует знаний о скорости переноса в них на макромасштабах и понимания ее взаимосвязи с внутренней структурой геля.

Как принято считать, принципиальным отличием переноса вещества в гелях от однородных жидких сред является его перемещение только за счет диффузионного механизма по микроканалам сложной формы и структуры, огибая макромолекулы дисперсной фазы, взаимодействие с которыми также оказывает влияние на скорость распространения переносимого вещества. Поскольку структура геля неоднородна в пространственном и временном плане, возможно возникновение застойных зон, куда или откуда диффузионный перенос осуществляется с временной задержкой. Таким образом, даже при одномерном переносе вещества в геле на макромасштабах диффузия на микроуровне всегда трехмерна, а ее скорость на временных масштабах локально непостоянна и пространственно не изотропна [77].

Для нестационарных процессов, когда поля концентраций не установились, диффузионные релаксационные процессы не завершились, процесс массопереноса на микромасштабах не может быть описан простым одномерным уравнением диффузии с постоянным коэффициентом. Характеризуя нестационарный массоперенос в геле на макромасштабах, речь может идти только об эффективных коэффициентах диффузии, существенно по своим значениям

отличающихся от истинных коэффициентов диффузии переносимого вещества в дисперсионной жидкости. Заметим, что в некоторых случаях такой подход представляется слишком упрощенным, поскольку даже эффективные коэффициенты диффузии будут зависеть от направления переноса и времени. Последнее определяется временным изменением самой структуры геля и соответственно его проницаемости.

В настоящее время представляется, что процессы диффузии в однородных жидких средах изучены и понятны. Однако это справедливо по отношению к стационарным процессам и некоторым простейшим ситуациям применительно к нестационарным. Существует много разнообразных факторов, влияющих на диффузионный перенос в однородных средах и изменяющих классические закономерности переноса массы, следующие из закона Фика или формулы Эйнштейна. К ним относятся: одномерная диффузия броуновских частиц в каналах сложной формы, когда коэффициент диффузии становится зависимым от геометрических характеристик канала; массоперенос некоторых веществ, когда их коэффициент диффузии зависит от концентрации, что не соответствует закону Фика; диффузия, когда скорость распространения вещества в среде является конечной и вместо закона Фика следует использовать закон Каттанео — Вернотте; диффузия в капиллярах и тонких каналах, когда на стенках имеет место адсорбция переносимого вещества или на свободной поверхности возникают эффекты, связанные с поверхностным натяжением, массоперенос при наличии конвективных течений различной природы и ряд других явлений.

Осложняющие диффузионный перенос факторы могут иметь место и в таких микроструктурированных средах, как гели. Однако, как правило, в публикациях либо приводятся многочисленные экспериментальные данные прямых измерений коэффициентов диффузии для различных сред и анализируется влияние на них физико-химических факторов, таких как объемная доля структурирующего вещества, энергия активации диффузии, концентрация кросс-линкера и ионная сила раствора и т. д., либо предлагаются различной степени обоснованности соотношения для расчета коэффициентов диффузии в гелях. Тем не менее в последнее время растет понимание, что законы массопереноса в микроструктурированных средах описываются закономерностями, отличными от закона Фика, даже при использовании его с эффективным коэффициентом диффузии [78].

На стыке механики жидкости и биофизики весьма актуальной стала область исследований активных жидкостей. Под активными жидкостями понимаются жидкости, содержащие частицы, которые поглощают энергию из окружающей среды или из внутреннего источника энергии и рассеивают ее в процессе внутренних передвижений. В качестве подобных частиц могут рассматриваться бактерии, микроскопические водоросли и другие микроорганизмы, а также живые клетки или клеточные экстракты. К активным частицам также можно отнести и небиологические и синтетические вещества. Подобные вещества могут не достигать термодинамического равновесия даже в стационарном состоянии из-за их непрерывного потребления энергии, именно эти свойства представляют большой интерес для физики. Активные жидкости могут рассматриваться как концентрированные суспензии активных частиц. Примерами активных жидкостей являются бактериальные суспензии и растворы компонентов цитоскелета. Термин «активный гель» также применим к этим веществам. Метод Больцмана был успешно применён для моделирования подобных систем [73], что позволяет сделать вывод о возможности дальнейшего развития исследования высококонцентрированных суспензий в рамках изучения свойств гелей и биологических систем.

2.6. Исследование конструктивных и эксплуатационных параметров шарошечного измельчителя пищевых отходов

Как уже отмечалось выше, существующие измельчители пищевых отходов имеют ряд недостатков, таких как образование настывлей из волокнистых и пленочных компонентов пищевых отходов на стенках диспозера, а также заклинивание шредера при размалывании твердых фракций (костей), что было установлено в ходе ряда испытаний. Для устранения данных недостатков была предложена новая конструкция измельчителя пищевых отходов [44].

Задачей шарошечного измельчителя пищевых отходов является повышение производительности устройства путём создания новой конструкции измельчающего механизма, позволяющей измельчать более широкий перечень видов перерабатываемых пищевых отходов и расширение области применения данного измельчителя в таких областях, как пищевая промышленность, сельское хозяйство.

Шарошечный измельчитель пищевых отходов содержит загрузочный люк, рабочую камеру, в которой размещён измельчающий орган, приводимый в движение приводом через вал, разгрузочное отверстие, соединённое с канализацией для удаления измельчённых пищевых отходов, *отличие* от других конструкций состоит в том, что рабочая камера снабжена неподвижной дробящей поверхностью, выполненной в виде полого конуса и установленной с зазором относительно измельчающего органа, выполненного в виде подвижной измельчающей шарошки, представляющей собой усеченный конус, на конической поверхности которой в шахматном порядке в три яруса размещены резьбовые гнезда, в которые ввинчены пирамидальные штифты для интенсификации процесса дробления, при этом подвижная измельчающая шарошка, размещенная в рабочей камере, установлена на валу и прикреплена к основанию чаши посредством болта с верхним закреплением, а неподвижная дробящая поверхность расположена по периферии верхней части рабочей камеры и перевернута полым конусом вниз.

Технический результат предложенного изобретения осуществляется за счет того, что новая конструкция измельчающего механизма позволяет перерабатывать как твердые компоненты пищевых отходов (кости), так и пленочные и волокнистые компоненты до размеров частиц, соответствующих нормативным требованиям, что позволяет его использовать не только в быту, но и в других областях, например в сфере общепита, пищевой промышленности и сельском хозяйстве выбрав соответствующий типоразмер измельчителя.

Это происходит потому, что в результате механического воздействия пищевые отходы, попадающие в зазор между полым конусом и подвижной измельчающей шарошкой, измельчаются до состояния пульпы и под действием силы тяжести и потока жидкости выводятся из устройства через разгрузочное отверстие, тем самым удаляясь из места образования пищевых отходов путём сброса в канализацию.

Процесс измельчения в устройстве производится без потерь и исключается возможность образования застойных и мертвых зон по всему объему рабочей камеры, а также улучшается качество дробления широкого спектра пищевых отходов, в результате чего повышается производительность процесса.

Шарошечный измельчитель пищевых отходов (рис. 2.22) работает следующим образом.

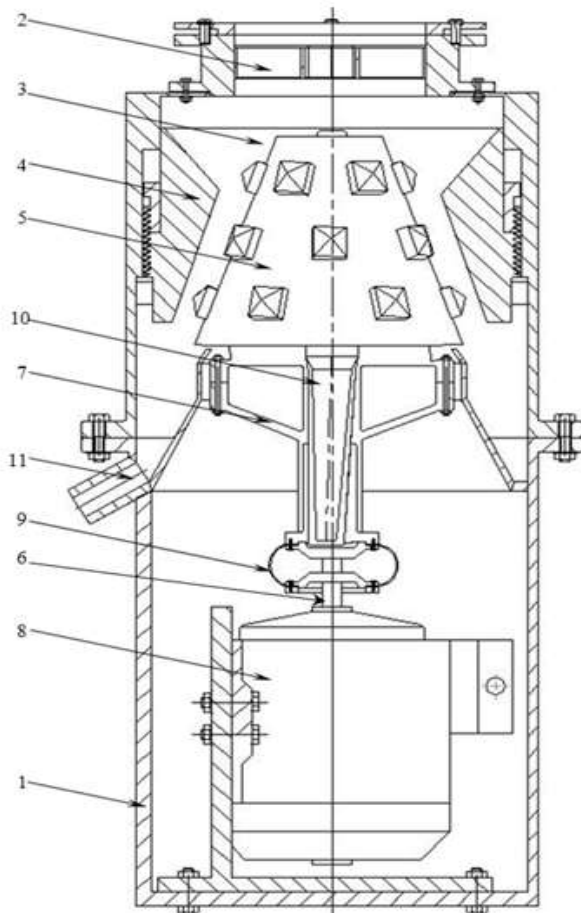


Рис. 2.22

Шарошечный измельчитель пищевых отходов

Измельчение осуществляется с подачей воды для всех видов пищевых отходов. Поступающие на измельчение пищевые отходы попадают в загрузочный люк 2. Далее пищевые отходы поступают в рабочую камеру 3, где измельчаются в зазоре (пространстве) между неподвижной наклонной дробящей поверхностью, расположенной в её верхней части и выполненной в виде полого конуса 4, и подвижной измельчающей шарошки 5, установленной на валу 6 и прикрепленной

к неподвижному основанию чаши 7. Шарошка 5 приводится в движение с помощью электродвигателя 8, работающего от бытовой электросети (220 В). Кроме того, в устройстве установлен дебаланс 10, необходимый при переработке пищевых отходов в зависимости от их размерности и твёрдости. Выполнен он с возможностью саморегулирования угла наклона подвижной измельчающей шарошки 5. Наиболее подходящим механизмом для этой цели оказалось конусное инерционное измельчение, которым впоследствии и был заменён диск с кулачковым измельчением с целью улучшения взаимодействия измельчаемых фракций с измельчающей поверхностью. На поверхности измельчающего конуса закреплены пирамидальные штифты [96] (рис. 2.23), улучшающие измельчение поступающих отходов.

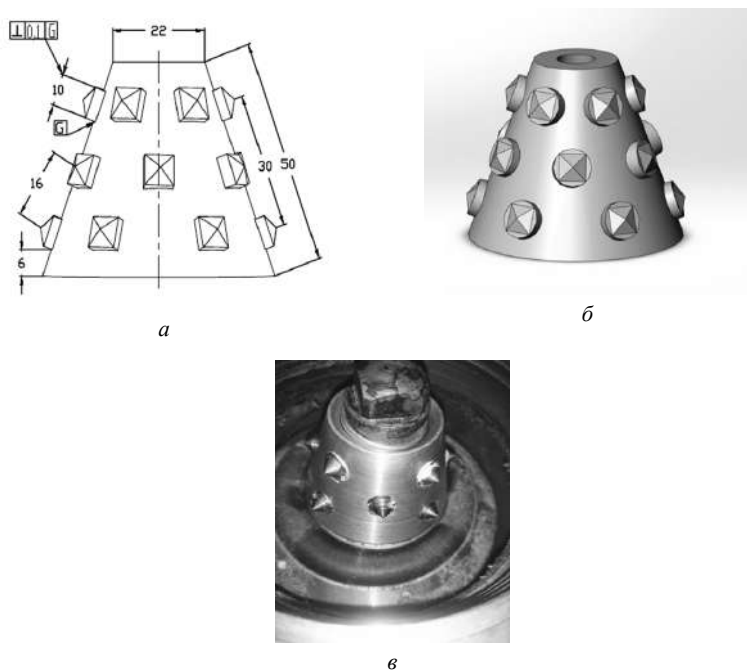


Рис. 2.23

Вид измельчающего конуса шарошечного измельчителя [88]:

а — схема; б — расчетная модель; в — экспериментальный образец.

В результате механического воздействия пищевые отходы, попадающие в зазор между полым конусом 4 и подвижной измельчаю-

шей шарошкой 5, измельчаются до состояния пульпы. Под действием силы тяжести и потока жидкости они выводятся из устройства через разгрузочное отверстие 11 и удаляются из места образования пищевых отходов путём сброса в канализацию. Таким образом, предложенная конструкция измельчителя пищевых отходов позволяет его использовать не только в быту, но и в других областях, например в сфере общепита, пищевой промышленности и сельском хозяйстве, выбрав соответствующий типоразмер измельчителя.

Для серийного [79, 113] и шарошечного измельчителей пищевых отходов [44] был проведен ряд сравнительных экспериментальных исследований зависимости крупности дробленых фракций пищевых отходов от мощности двигателя.

Исследования проводились сериями из 10 опытов с образцами различных отходов массой по 3 кг каждого вида [80]. Были исследованы процессы измельчения для следующих видов отходов: кости крупного рогатого скота с максимальным размером 100–150 мм и размером 50–70 мм, кости мелкого рогатого скота размером 50–70 мм, свиные кости размером 50–70 мм, рыбные кости размером 50–70 мм, шкуро-жировые пленочные отходы, отходы сыроваренной, зерновой и хлебопекарной продукции, а также растительных, волокнистых отходов, овощных и фруктовых косточковых отходов.

К основным эксплуатационным характеристикам, определяющим работоспособность подобных конструкций, можно отнести:

- коэффициент сопротивления пульпы на поверхности каждого измельчающего органа, в значительной степени определяющий степень дисперсности пульпы;
- уровень усталостных деформаций измельчающих органов, определяющий межремонтный ресурс измельчителей;
- неравномерность нагрева поверхностей измельчающих органов, определяющую ресурс пирамидальных штифтов и измельчающих кулачков измельчителей до замены или заточки.

Кроме того, были проведены сравнительные расчетно-теоретические исследования эксплуатационных характеристик шарошечного измельчителя и измельчителя в виде диска с измельчающими кулачками (диспоузера). К основным эксплуатационным характеристикам, определяющим работоспособность подобных конструкций, можно отнести:

- коэффициент сопротивления пульпы на поверхности каждого измельчающего органа, в значительной степени определяющий степень дисперсности пульпы;

- уровень усталостных деформаций измельчающих органов, определяющий межремонтный ресурс измельчителей;
- неравномерность нагрева поверхностей измельчающих органов, определяющую ресурс пирамидальных штифтов и измельчающих кулачков измельчителей до замены или заточки.

Исследования проводились путём компьютерного моделирования с помощью программы Solid Works Flow Simulation [112, 114]. В данной программе для моделирования работы обоих аппаратов были приняты следующие одинаковые параметры рабочей среды:

- температура подаваемых пищевых отходов — 35°C;
- скорость подачи пищевых отходов — 60 кг/ч;
- температура подаваемой воды — 25°C;
- скорость подачи воды — 72 л/ч;
- средняя температура получаемой пульпы — 40°C;
- минимальная плотность поступающих пищевых отходов — 245 кг/м³;
- максимальная плотность поступающих пищевых отходов — 1250 кг/м³;
- вязкость пульпы — 30 мм²/с;
- теплоёмкость пульпы — 835 Дж/(кг·°C).

В первую очередь было исследовано распределение коэффициента гидравлического сопротивления по поверхности каждого рабочего органа измельчителей пищевых отходов. Из трех реализованных вариантов описания коэффициента сопротивления был выбран тот, который соответствует паспортным параметрам измельчителя [109] и является функцией скорости [110]:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \cdot \frac{\left(1 - \frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2 + \frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{\ln\left(\frac{d}{D}\right)}}, \quad (2.17)$$

где λ — безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления; Re — критерий Рейнольдса; d — диаметр конуса, мм; D — диаметр рабочей камеры, мм.

Формула (2.17) справедлива для значений коэффициента $\text{Re} = 120$ [115].

Результаты моделирования представлены на рисунке 2.24.

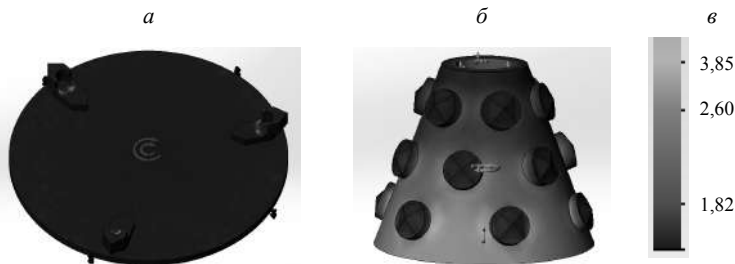


Рис. 2.24

Распределение коэффициента гидравлического сопротивления по поверхности рабочего органа:

а — диск с измельчающими кулачками; б — измельчающая шарошка; в — значения коэффициента сопротивления, рассчитаны по формуле (2.17).

Расчеты коэффициента сопротивления среды показали, что его значения на $\approx 60\%$ меньше для шарошечного измельчителя по сравнению с дисковым кулачковым, как при расчетах в варианте с чистой водой, так и с пульпой. Отсюда следует, что для одних и тех же отходов на одинаковых режимах работы, при одинаковой мощности привода шарошечный измельчитель, позволяющий получить пульпу с частицами в 1,3–1,5 раза меньшими, является более экономичным в эксплуатации. Очевидно, это вызвано формой поверхности рабочего органа в шарошечном измельчителе по сравнению с дисковым измельчителем с дробящими кулачками за счет большего количества дробящих воздействий за 1 оборот. Такой вывод следует и из результатов сравнительных технологических исследований работ [80, 111].

Так как при измельчении пищевых отходов (например, крупных костей, косточек фруктов, ягод и т. п.) в рабочем органе аппарата происходит ударная деформация его поверхности, в данной работе было проведено сравнительное исследование усталостной деформации поверхностей рабочих органов шарошечного и дискового кулачкового измельчителей пищевых отходов. Результирующая деформация рассчитывалась согласно гипотезе о линейной суперпозиции повреждений, т. е. по правилу Майнера [112]:

$$E[D] = \sum_i \frac{n_i}{N_i}, \quad (2.18)$$

где $E[D]$ представляет собой прогнозируемую поврежденность, %; n_i — количество циклов соударений на соответствующей рабочей частоте вращения рабочего органа; N_i — число циклов, вызывающее раз-

рушение, согласно кривой усталости материала отображающей способность материала сопротивляться усталостному разрушению [113].

При расчёте усталостных деформаций по программному комплексу работы была выбрана формула, соответствующая условиям проведения эксперимента [116]:

$$k = \text{grad}(P)/(\rho \cdot v), \quad (2.19)$$

где P — давление пульпы, МПа; ρ — ее усредненная плотность; v — скорость в относительном движении вдоль поверхности рабочего органа.

Результаты данного моделирования изображены на рисунках 2.25–2.27.

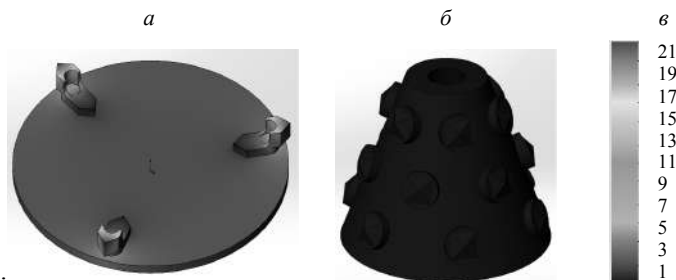


Рис. 2.25

Распределение усталостных деформаций по поверхности рабочего органа при 10^4 циклах работы:

а — диск с измельчающими кулачками; б — измельчающая шарошка; в — шкала деформации поверхности, в % от площади поверхности рабочего органа.



Рис. 2.26

Распределение усталостных деформаций по поверхности рабочего органа при 10^4 – 10^7 циклах работы:

а — диск с измельчающими кулачками; б — измельчающая шарошка; в — шкала деформации поверхности, в % от площади поверхности рабочего органа.

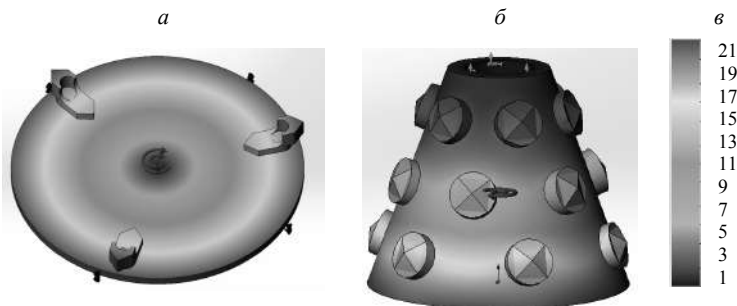


Рис. 2.27

Распределение усталостных деформаций по поверхности рабочего органа при 10^7 – 10^9 циклах работы:

а — диск с измельчающими кулачками; б — измельчающая шарошка; в — шкала деформации поверхности, в % от площади поверхности рабочего органа.

Результаты компьютерного моделирования, представленные на рисунках 2.25–2.27, показали, что шарошечная конструкция рабочего органа измельчителя пищевых отходов более устойчива к усталостным деформациям по сравнению с дисковой кулачковой. Как следует из рисунка 2.27, при 10^7 – 10^9 циклах усталостные деформации некоторых областей рабочих органов измельчителя превышают 20% от площади его поверхности, в результате чего кулачки диска меняют форму, что снижает эффективность работы на 47% и требуется их замена. Дробящая шарошка в аналогичных условиях снижает эффективность работы из-за изменения формы штифтов — только на 13%.

Ударные деформации рабочего органа измельчителя пищевых отходов в процессе его работы сопровождаются неравномерным повышением температуры его поверхности, что ведет к росту термических напряжений и снижению прочности материалов кулачков и штифтов и, как следствие, к уменьшению времени их непрерывной работы до замены или заточки.

Покидая зону измельчения, нагретая до температуры $T_{\text{деф}}$ пульпа взаимодействует с поверхностью штифта измельчающей шарошки на площади S с относительной скоростью $\frac{v}{\xi}$, где v — скорость движения пульпы, ξ — функция неразрушимости, которая описывается выражением [114]:

$$\xi = R - T < 0,$$

где R — функция распределения прочности штифта; T — функция распределения сил, действующих на штифт.

Выделяющееся тепло за счёт работы силы трения пульпы по поверхности штифта в единицу времени рассчитывается по [111]:

$$Q_{\text{тр}} = \frac{F_n \cdot v}{E \cdot \xi}. \quad (2.20)$$

Для определения температуры на поверхности штифта, полученной в результате измельчения, представим штифт как твердый стержень, на одной стороне которого поддерживается постоянная температура $Q_{\text{тр}}$, имеющий поперечное сечение $b \times l$. Для решения поставленной задачи используем уравнение теплопроводности [114]:

$$\frac{\partial Q_{\text{тр}}}{\partial \tau} = \omega \frac{\partial^2 Q_{\text{тр}}}{\partial x^2}, \quad (2.21)$$

где $\omega = \frac{\lambda}{c' d'}$ — температуропроводность; λ — теплопроводность штифта; c' — теплоемкость штифта; d' — плотность штифта; τ — время, в течение которого пульпа проходит площадь контакта длиной l :

$$\tau = \frac{l \cdot \xi}{v}.$$

Пренебрегая температурой внешней среды и минуя промежуточные вычисления, получим для наших условий:

$$Q_{\text{тр}} = \frac{F_n \sqrt{v \cdot \frac{1}{\xi} \pi}}{2E \cdot b \sqrt{\lambda \cdot c \cdot d \cdot l}}. \quad (2.22)$$

Суммируя температуру, получаемую в результате деформации пищевых отходов, и температуру трения дробленых пищевых отходов по поверхности шарошки, получим среднюю температуру поверхности рабочего органа:

$$T_n = T_{\text{деф}} + T_{\text{тр}} = \frac{\alpha \cdot p \left[(1 - \beta) - (\sin \gamma + \mu \cdot \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right]}{E \cdot c \cdot d} + \frac{F_n \sqrt{\frac{v}{\xi} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2}}}{E \cdot b \sqrt{\lambda \cdot c \cdot d \cdot l}}. \quad (2.23)$$

Принимая, что удельная сила измельчения $\frac{P}{S} = p$ кгс/мм², уравнение (2.23) может быть преобразовано к виду

$$(T_{\text{деф}} - T_{\text{ок.с}})_{\text{ср}} = \frac{\alpha \cdot P \cdot v \left[(1 - \beta) - (\sin \gamma + \mu \cdot \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right]}{E \cdot c \cdot d \cdot S \cdot v}, \quad (2.24)$$

где $T_{\text{деф}}$ — средняя температура частицы, когда последняя покидает зону деформации, в °С; $T_{\text{ок.с}}$ — температура окружающей среды, °С; α — коэффициент, учитывающий потерю теплоты ($\alpha_0 = 0,95$); β — коэффициент, учитывающий переход тепла в шарошку (по Вейнеру) [112] ($\beta = 0,1$ при $v = 100$ м/мин, $\beta = 0,05$ при $v = 300$ м/мин); E — механический эквивалент теплоты ($E = 247 \cdot 10^{-3}$ кгс·м/ккал); c — теплоемкость нагретой пульпы, ккал/кгс·град; d — плотность пульпы ($5,6 \cdot 10^{-6}$ кгс/мм³); S — площадь поверхности контакта, мм².

Распределение температуры по поверхности диска с кулачками и измельчающей шарошки за счёт деформации рассчитывалось по формуле (2.24) с помощью интерактивного программного модуля Mean Radiant Temperature программы [110].

Результаты моделирования процесса представлены на рисунке 2.28.

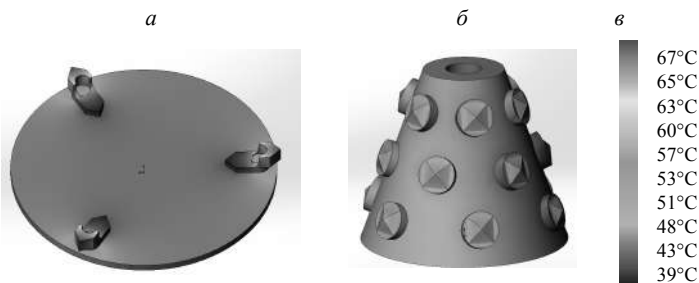


Рис. 2.28

Распределение температуры по поверхности рабочего органа:

*а — диск с измельчающими кулачками; б — измельчающая шарошка;
в — шкала температур областей рабочего органа.*

Из результатов исследований следует, что шарошечный измельчитель пищевых отходов более устойчив к разрушению рабочей поверхности при измельчении более широкого спектра перерабатывае-

мых пищевых отходов по сравнению с кулачковым дисковым измельчителем. Кроме того, этот аппарат является менее ресурсоемким по сравнению с аналогами.

Одной из важнейших характеристик, показывающей преимущество конструкции [88] по сравнению с [22, 23, 109], является объемная скорость дробления пищевых отходов (рис. 2.29).

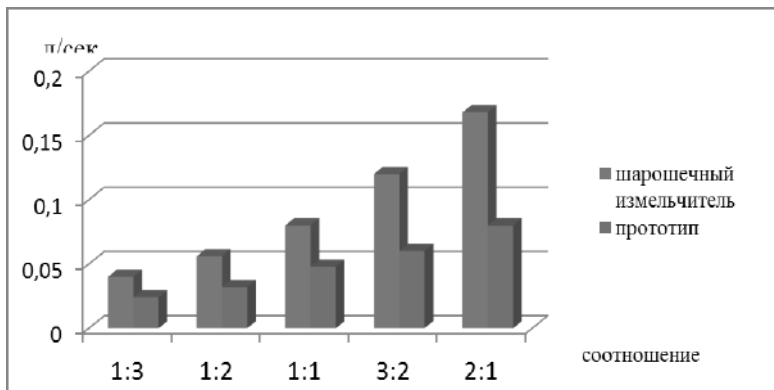


Рис. 2.29

Объемная скорость дробления пищевых отходов в измельчителях пищевых отходов в зависимости от соотношения «отходы — вода»

Для серийного [108] и шарошечного измельчителей пищевых отходов [44] был проведен ряд сравнительных экспериментальных исследований зависимости крупности дробленых фракций пищевых отходов от мощности двигателя. Исследования проводились сериями из 10 опытов с образцами различных отходов массой по 3 кг каждого вида [80].

Были исследованы процессы измельчения для следующих видов отходов: кости крупного рогатого скота с максимальным размером 100–150 мм и размером 50–70 мм, кости мелкого рогатого скота размером 50–70 мм, свиные кости размером 50–70 мм, рыбные кости размером 50–70 мм, шкуро-жировые пленочные отходы, отходы сыроваренной, зерновой и хлебопекарной продукции, а также растительных, волокнистые отходы, овощные и фруктовые косточковые отходы. Усредненные по 10 опытам результаты экспериментов приведены на рисунках 2.30–2.39.

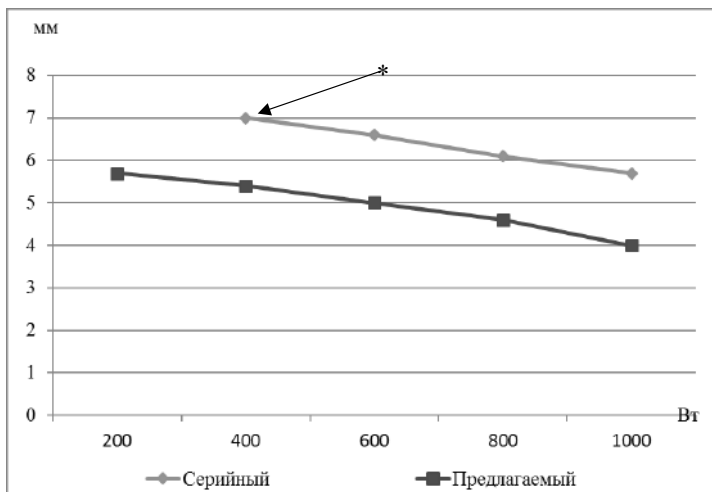


Рис. 2.30

Зависимость крупности фракций пищевых отходов от мощности привода диспозера для костей крупного рогатого скота с максимальным размером 100–150 мм:

* — невозможно произвести измельчение из-за заклинивания аппарата.

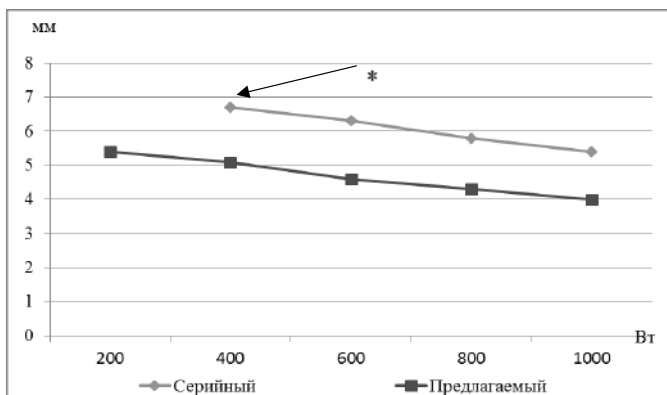


Рис. 2.31

Зависимость крупности фракций пищевых отходов от мощности привода диспозера для костей крупного рогатого скота с максимальным размером 50–70 мм:

* — невозможно произвести измельчение из-за заклинивания аппарата.

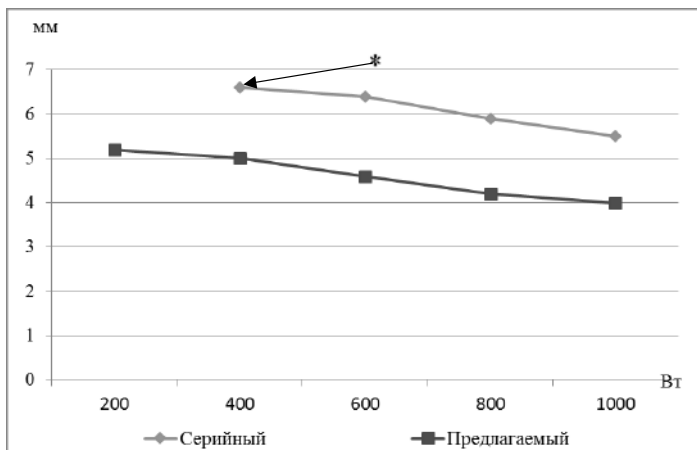


Рис. 2.32

Зависимость крупности фракций пищевых отходов от мощности привода измельчителя для костей мелкого рогатого скота размером 50–70 мм:

* — невозможно произвести измельчение из-за заклинивания аппарата.

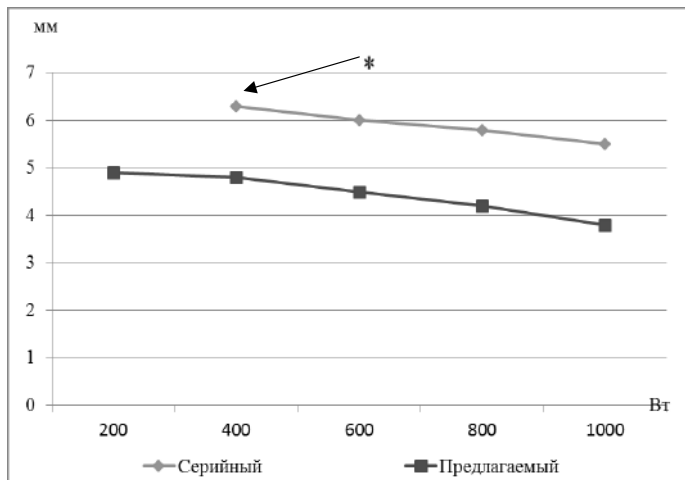


Рис. 2.33

Зависимость крупности фракций пищевых отходов от мощности привода измельчителя для свиных костей размером 50–70 мм:

* — невозможно произвести измельчение из-за заклинивания аппарата.

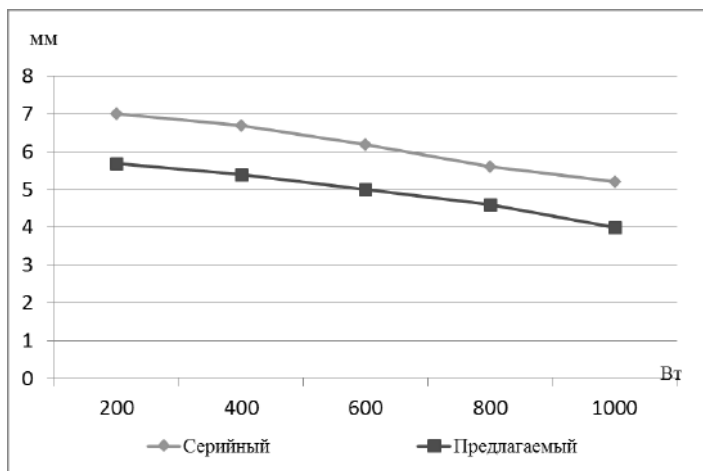


Рис. 2.34

Зависимость крупности фракций пищевых отходов от мощности двигателя измельчителя для рыбных костей размером 50–70 мм

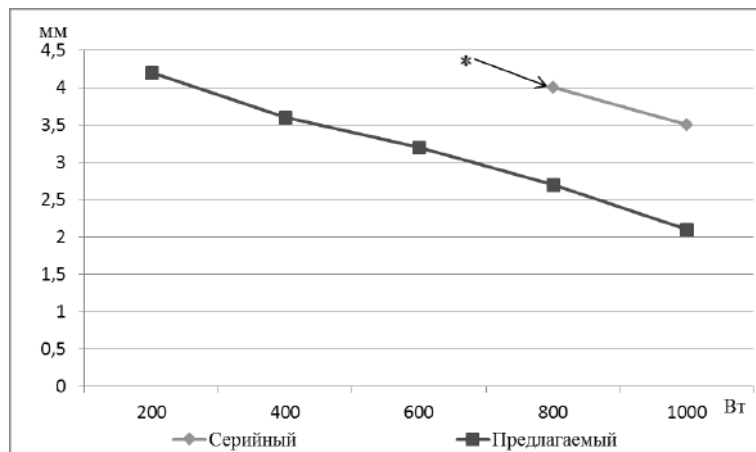


Рис. 2.35

Зависимость крупности фракций пищевых отходов от мощности двигателя измельчителя для шкуро-жировых компонентов:

* — происходит налипание жира на рабочие части аппарата и, как следствие, остановка двигателя.

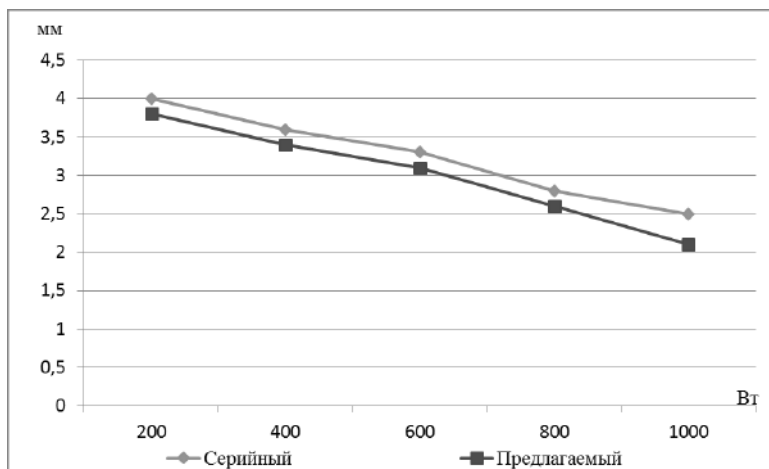


Рис. 2.36

Зависимость крупности фракций пищевых отходов от мощности двигателя измельчителя для отходов сыроваренной продукции

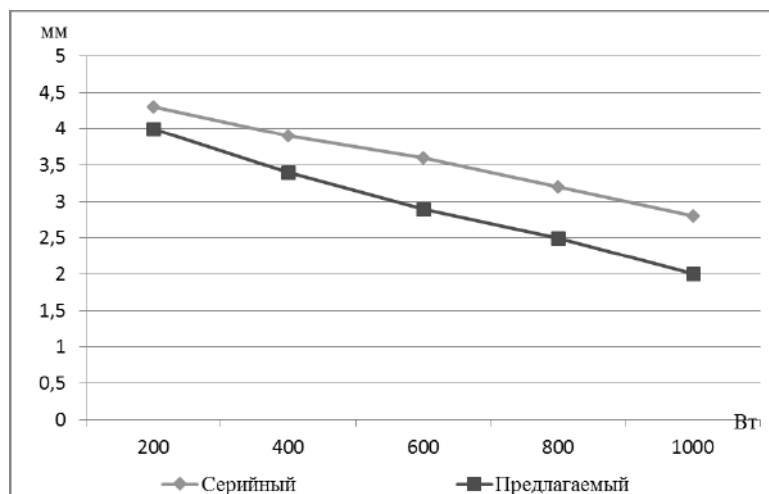


Рис. 2.37

Зависимость крупности фракций пищевых отходов от мощности двигателя измельчителя для овощных и фруктовых косточковых отходов

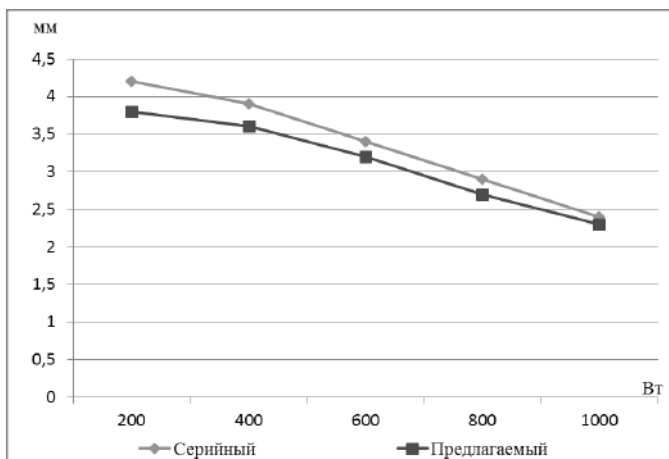


Рис. 2.38

Зависимость крупности фракций пищевых отходов от мощности двигателя для отходов зерновой и хлебопекарной продукции

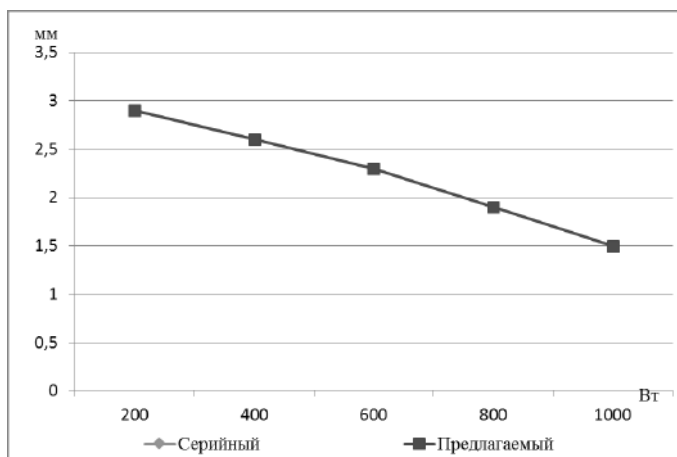


Рис. 2.39

Зависимость крупности фракций пищевых отходов от мощности двигателя измельчителя для пленочных отходов:

в серийном измельчителе пищевых отходов в рассмотренном диапазоне мощностей происходит наматывание материала на рабочие части аппарата и выход его из строя.

Крупность фракций пульпы пищевых отходов была соотнесена с крупностью хозяйственно-бытовых сточных вод [81, 82]. Результаты сравнения приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6

Распределение крупности фракций в смеси

Размер частиц, мм	Фракции пульпы, %	Фракции фекальных стоков, %
Менее 1	—	—
1–5	10	—
5–10	40	1
10–15	25	4
15–20	15	5
20–25	10	8
25–30	—	7
30–35	—	10
35–40	—	15
40–45	—	35
45–50	—	15

Проанализировав диаграмму, можно сделать вывод, что крупность твердых частиц пульпы пищевых отходов соответствует нормам, предъявляемым к сбросам в городские канализационные сети [118].

Пищевые отходы состоят на 70% из воды и на 30% из твердых веществ [87]. Типичный состав пищевых отходов и хозяйственно-бытовых стоков (табл. 2.7) можно считать сходным.

Таблица 2.7

**Типичный состав пищевых отходов
и хозяйственно-бытовых стоков**

Вид	C%	H%	O%	N%	S%
Фекальные стоки ($C_{10}H_{19}O_3N$)	59,7	9,5	23,8	7,0	0
Пищевые отходы, твердая органика ($C_{21,53}H_{34,21}O_{12,66}S_{0,07}$)	50,5	6,72	39,6	2,74	0,44

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что предложенная конструкция шарошечного измельчителя пищевых отходов позволяет значительно расширить перечень перерабатываемых пищевых отходов и более эффективна в эксплуатации по сравнению с диском с дробящими кулачками.

Также стоит отметить, что при использовании данного метода сбрасываемая пульпа попадает на станции аэрации городских очистных сооружений [102, 103], минуя самую затратную операцию — автомобильную транспортировку в составе ТБО.

В рамках настоящего исследования было проведено сравнение экологических характеристик станций аэрации, входящих в состав городских очистных сооружений, в штатном режиме работы и при использовании метода канализационной транспортировки пульпы пищевых отходов.

Как известно, в состав полученного в процессе брожения на очистных сооружениях биогаза входит метан и углекислый газ [104], при этом примеси углекислого газа в составе биогаза понижают его калорийность и, как следствие, энергоэффективность [105]. С целью установления влияния описываемого метода на технологический процесс сбраживания биогаза на очистных сооружениях было рассчитано:

- количество метана, образующегося от пульпы пищевых отходов;
- количество углекислого газа, образующегося от пульпы пищевых отходов за один производственный цикл;
- количество выделяемых ароматических углеводов от пульпы пищевых отходов за один производственный цикл.

Результаты представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Сравнительные экологические характеристики станций аэрации

Показатель	Без использования метода	При использовании метода
Количество метана в получаемом биогазе, %	38–65	50–78
Количество углекислого газа, выбрасываемого за производственный цикл, г/ч	130–300	90–165
Количество выделяемых ароматических углеводов в 1 м ³ воздуха, м ³	0,16	0,057

Из приведенных в таблице 2.8 результатов расчета следует, что добавка пищевых отходов к хозяйственно-бытовым стокам повышает калорийность биогаза при его сжигании, уменьшает парниковый эффект и снижает загрязнение окружающей воздушной среды.

Глава 3

ВЛИЯНИЕ КАНАЛИЗАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЛЬПЫ ПИЩЕВЫХ ОТХОДОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРОДСКИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

3.1. Оценка количества осадка из пульпы пищевых отходов в стоках

В этой главе представлены результаты расчетных исследований нагрузки на очистные сооружения жилищно-коммунального хозяйства, загрязнение селитебных зон и окружающих экосистем при внедрении разработанного метода пульповой переработки и канализационной транспортировки органических отходов, образующихся при переработке кожевенного и мехового сырья, предприятий легкой промышленности и общественного питания, расположенных в городской среде.

В первую очередь было определено качество поступающих сточных вод на городские водоочистные сооружения [73] (табл. 3.1).

Таблица 3.1

**Характеристика поступающих сточных вод
на городские очистные сооружения**

№ п/п	Показатели качества воды	Значение показате- лей качест- ва воды	Допустимая факти- ческая concentra- ция загрязняющих веществ при сбросе, мг/л	ПДК для ры- бохозяйствен- ного водо- пользования [71, 72], мг/л
1	рН	7,6	—	—
2	Взвешенные вещества, мг/л	166,7	12	11,25
3	Ионы аммония, мг/л	18,3	3,0	0,4
4	Оксид азота (IV), мг/л	0,015	0,5	0,066
5	Соли азотной кислоты, мг/л	1,59	53	40,04
6	Биологическое потребление ки- слорода, мг/л	166,7	8,0	3,0

№ п/п	Показатели качества воды	Значение показателей качества воды	Допустимая фактическая концентрация загрязняющих веществ при сбросе, мг/л	ПДК для рыбохозяйственного водопользования [71, 72], мг/л
7	Химическое потребление кислорода, мг/л	333,3	—	—
8	Железо, мг/л	1,58	0,25	0,1
9	Фосфаты, мг/л	2,5	2,5	0,2
10	Медь, мг/л	0,023	0,01	0,001
11	Цинк, мг/л	0,21	0,15	0,01
12	Синтетические поверхностно-активные вещества, мг/л	1,54	0,15	0,15
13	Фенолы, мг/л	0,013	0,002	0,001
14	Сульфаты, мг/л	59	90	90
15	Хром, мг/л	0,048	0,015	0,015
16	Алюминий, мг/л	1,16	0,1	0,04

3.1.1. Расчёт объёма образуемого сырого осадка

Сырой осадок первичных отстойников представляет собой густую суспензию серого, коричневого цвета. Так как в нем содержится большое количество органических веществ, в сыром осадке быстро начинаются процессы загнивания. В результате этого процесса сырой осадок приобретает черно-серый цвет и выделяет большое количество ароматических углеводородов, которые неблагоприятно влияют на располагающиеся поблизости рекреационные объекты, жилые дома, а также негативно воздействуют на строительные объекты водохозяйственных комплексов.

Осадки первичных отстойников имеют влажность 90–97% и вследствие своей структуры и большого количества коллоидных веществ плохо отдают воду [112].

Объём образуемого осадка в сутки определяется по выражению [113]:

$$V_{\text{ос}} = \frac{100}{(100 - W_{\text{ос}})} \cdot \frac{C \cdot \Xi \cdot K \cdot Q}{2000}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (3.1)$$

где C — исходная концентрация взвешенных веществ, мг/м³; $\Xi = 0,5$ — эффект от задержания взвешенных веществ в первичных

отстойниках, выражается в долях единицы; K — безразмерный коэффициент, который учитывает увеличение объема осадка за счет крупных фракций пульпы (обычно это значение принимают равным 1,1–1,2); Q — количество сточной воды, поступающей на городскую станцию очистки, $\text{м}^3/\text{сут}$; $W_{\text{ос}} = 97$ — влагосодержание сырого осадка, выражается в процентах.

$$V_{\text{ос}} = \frac{100}{(100-97)} \cdot 175 \approx 5850 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

3.1.2. Избыточный активный ил

Избыточный активный ил представляет собой отходы биологической очистки сточных вод в аэротенках и выражается в виде прироста микроорганизмов [114]. Избыточный активный ил (до 50%) может быть частично передан в преаэраторы или первичные отстойники. Его содержание в сырой жидкости до 100 мг/л не оказывает влияния на работу первичных отстойников. Остаток избыточного активного ила перед подачей в метантенки подвергается уплотнению. Общее количество избыточного активного ила в аэротенках в соответствии со СНиПом находится в зависимости от ВПК выходящей жидкости.

Тогда объемное количество избыточного активного ила [113]:

$$V_{\text{изб}} = \frac{100}{v \cdot (100 - W_{\text{изб.ос}})} \cdot \frac{(0,8 \cdot B + 0,3 \cdot L_a - a)}{10^6} \cdot Q, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (3.2)$$

где a — вынос взвешенных веществ из вторичных отстойников, мг/л; Q — объем поступающих на очистную станцию сточных вод, $\text{м}^3/\text{сут}$; B — количество взвешенных веществ в поступающей в аэротенк сточной воде, мг/л; L_a — полное биологическое потребление кислорода в поступающих в аэротенк сточных водах, мг/л; $v = 1,001$ — значение объемного веса активного ила, выражается в $\text{г}/\text{м}^3$; $W_{\text{изб.ос}} = 99,4$ — значение влажности активного ила, выражается в %.

$$V_{\text{изб}} = 19\,500 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

3.1.3. Химический ил

Биологическая очистка сточных вод химическим илом, представляющим собой биоценоз зоогенных скоплений бактерий и простейших организмов, осуществляется с целью удаления из них таких органических веществ, как азот и фосфор.

Предполагаемое суточное количество химического ила 10 т/сут.

Если среднее содержание сухого вещества принять равным 2%, то количество отбираемого из систем флотации ила составит [113]:

$$V_{\text{хим}} = \frac{100}{v \cdot (100 - W_{\text{хим.ос}})} \cdot U_{\text{хим}}, \text{ м}^3/\text{сут}; \quad (3.3)$$

$$V_{\text{хим}} = \frac{100}{1 \cdot (100 - 98)} \cdot 10 = 500, \text{ м}^3/\text{сут}.$$

3.2. Анализ потребности в оборудовании для обработки осадков из пульпы органических отходов легкой промышленности

3.2.1. Технологический расчет сгустителей сырого осадка

Сгустители [74] предназначены для сгущения осадка, образующегося в процессе очистки воды с использованием реагентов (коагулянта, полиакриламида, извести) на станциях водоподготовки. Сгустители осадка применяют для обработки осадка, образующегося после отстаивания промывной воды от контактных осветлителей, входящих в состав станций очистки воды поверхностных источников мутностью исходной воды до 150 мг/л с учетом графиков промывки контактных осветлителей, отстаивания промывной воды в течение 2 часов, уплотнения осадка на сгустителях.

Полученный в первичных отстойниках сырой осадок для сгущения перекачивается насосом в гравитационные сгустители. На станции для сгущения осадка используются илоуплотнители радиального типа.

Для илоуплотнителей данного типа полезная площадь определяется по формуле (4.4) [113]

$$F_{\text{пол}} = \frac{q_{\text{max}}}{q_{\text{сух.вещ}}}, \text{ м}^2, \quad (3.4)$$

где q_{max} — количество образующегося сырого осадка, кг/ч;
 $q_{\text{сух.вещ}} = 2,5$ — количественное выражение нагрузки по сухому веществу осадка, кг/ч·м².

$$F_{\text{пол}} = \frac{3000}{2,5} = 1200 \text{ м}^2.$$

Диаметр радиального илоуплотнителя по формуле (4.5) [113]:

$$D_{р.и} = 2 \cdot \sqrt[2]{\frac{F_{пол}}{3,14 \cdot n}}, \text{ м}; \quad (3.5)$$

$$D_{р.и} = 20 \text{ м.}$$

Сгуститель осадков имеет следующие габариты:

- внутренний диаметр — 20 м;
- полезная глубина — 3,2 м;
- уклон дна — 10%.

Сгущенный ил удаляется в помощью насоса, а осадок подается в распределитель на сгущение.

Объем уплотненного сырого осадка составит по формуле [113]

$$V_{упл} = \frac{100 - W_{ос}}{100 - W_{ос,уп}} V_{ос}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (3.6)$$

где $V_{ос}$ — количество образуемого сырого осадка, $\text{м}^3/\text{сут}$; $W_{ос}$ — влагосодержание сырого осадка перед подачей в илоуплотнитель, %; $W_{ос,уп}$ — влагосодержание осадка после илоуплотнителя, %.

$$V_{упл} \approx 3500 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Максимально отделяемое в процессе уплотнения количество жидкости можно определить по формуле [113]:

$$V_{жид} = \frac{W_{ос} - W_{ос,уп}}{100 - W_{ос,уп}} V_{ос}, \text{ м}^3/\text{сут}; \quad (3.7)$$

$$V_{жид} \approx 2350 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

3.2.2. Этап механического сгущения избыточного активного и химического ила

Несмотря на то что флотационные методы обладают рядом достоинств, их применение без дополнительных приемов не всегда дает высокую степень разделения. При влажности после флотации активного ила 95–97% высок вынос взвешенных веществ (0,3–1,5 г/л). Флотацию целесообразно использовать для уплотнения молодого активного ила, имеющего иловый индекс более 100–120 мл/г, всплывающих активных илов (с высоким иловым индексом) при протекании в иловой жидкости денитрификации, сопровождаемой выделением пузырьков молекулярного азота. Расходы электрической энергии и эксплуатационные затраты при использовании метода флотационного уплотнения выше, чем гравитационного [110].

Химический и избыточный активный ил перед тем, как подать на оборудование, для сгущения осадка перемешивают. Исходя из этого условия, общий расход смеси ила будет вычисляться по формуле

$$V_{\text{общ}} = V_{\text{хим}} + V_{\text{изб}}, \text{ м}^3/\text{сут}; \quad (3.8)$$

$$V_{\text{общ}} \approx 20\,000 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Исходя из общего расхода смеси ила, принимаем 5 резервуаров-усреднителей. Объем каждого усреднителя принимаем равным 4000 м^3 .

Резервуар-усреднитель представляет собой простую емкость цилиндрической формы диаметром 20 м и высотой 3 м. Перемешивание жидкости обеспечено механическими мешалками [111].

Средняя влажность смеси составляет [113]:

$$W_{\text{см.ср}} = \left(1 - \frac{Q_{\text{изб}} + Q_{\text{хим}}}{V_{\text{изб}} + V_{\text{хим}}} \right) \cdot 100, \%; \quad (3.9)$$

$$W_{\text{см.ср}} = 99,5\%.$$

Перед подачей в механический сгуститель осадок из резервуара-усреднителя кондиционируют полимером, способным к ионизации молекул раствора. Принимаем удельную потребность в полиэлектrolите необходимого для сгущения 7 г/кг . При таких условиях суточный расход полиэлектrolита составит [113]

$$m = 58 \cdot 10^3 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} = 40 \text{ кг/сут}.$$

Для обеспечения такого суточного расхода полиэлектrolита необходимо предусмотреть установку 2 блоков для растворения полиэлектrolита. Производительность каждого блока принимаем равной 12 кг/ч .

Изначально раствор готовят с концентрацией 5 кг/м^3 , а затем необходимая концентрация раствора достигается путем разбавления концентрированного раствора технической водой. В соответствии с техническим регламентом разбавленный раствор хранится не более 24 часов.

На основании результатов расчетов принимаем 6 сгустителей типа БС-4 каждый со средней производительностью $45 \text{ м}^3/\text{ч}$ и мощностью привода $1,50 \text{ кВт}$.

Расход уплотненного осадка при заданной влажности в 95% составляет $q_{\text{изб}} = 2800 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Максимальное количество отделяемой в процессе уплотнения жидкости составит $q_{\max} = 17\,200 \text{ м}^3/\text{сут.}$

3.3. Расчет метантенков для сбраживания пульпы органических отходов легкой промышленности

Метантенк — аппарат, предназначенный для анаэробного сбраживания стоков с высоким содержанием органических соединений с получением метана. В метантенк поступает концентрированный осадок сточных вод, выпадающий в отстойниках [116].

После первичных отстойников:

- количество осадка составляет 175 т/сут. ;
- количество сухого вещества — 58 т/сут. ;
- объем сырого осадка — $3400 \text{ м}^3/\text{сут.}$;
- объемный расход избыточного химического и активного ила — $2400 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Расчёт метантенков производился в соответствии с [113].

Количество беззольного вещества осадка рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{без.в}} = (100 - Z_{\text{ос}}) \cdot (100 - B_{\text{г}}) \cdot 10^{-4} \cdot Q_{\text{ос}}, \text{ т/сут.}, \quad (3.10)$$

где $B_{\text{г}} = 5$ — гигроскопическое влагосодержание сырого осадка, выражается в %; $Z_{\text{ос}} = 30$ — зольность сырого осадка, выражается в %.

$$Q_{\text{без.в}} \approx 115 \text{ т/сут.}$$

Для определения количества беззольного активного ила используют формулу

$$Q_{\text{без.ил}} = (100 - Z_{\text{ил}}) \cdot (100 - B_{\text{г.ил}}) \cdot 10^{-4} \cdot Q_{\text{изб.ил}}, \text{ т/сут.}, \quad (3.11)$$

где $B_{\text{г.ил}} = 5$ — показатель гигроскопической влажности ила, выражается в %; $Z_{\text{ил}}$ — зольность активного ила принимается равной 25%.

$$Q_{\text{без.ил}} \approx 84 \text{ т/сут.}$$

Суммарный расход осадков по объему смеси фактической влажности:

$$\begin{aligned} M_{\text{общ}} &= U_{\text{без.ил}} + Q_{\text{без.ил}}, \text{ м}^3/\text{сут.}; \\ M_{\text{общ}} &= 6285 \text{ м}^3/\text{сут.} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Средние значения зольности и влажности смеси находят по формулам (3.13) и (3.14):

$$B_{\text{см}} = \left(1 - \frac{U_{\text{сух.сум}} + Q_{\text{сух}}}{W_{\text{упл}} + q_{\text{изб}}} \right) \cdot 100, \%; \quad (3.13)$$

$$B_{\text{см}} = 97,3\%;$$

$$Z_{\text{см}} = \left(1 - \frac{U_{\text{без.ил}} + Q_{\text{без.ил}}}{\frac{Q_{\text{сух}}(100 - B_{\Gamma})}{100} + \frac{U_{\text{см.сух}}(100 - B'_{\Gamma})}{100}} \right) \cdot 100, \%; \quad (3.14)$$

$$Z_{\text{см}} = 30\%.$$

Существует 2 варианта сбраживания осадка:

1) мезофильное сбраживание, основным достоинством которого является обеспечение технологического процесса теплом, образующегося от сжигания газов брожения;

2) термофильное сбраживание, которое отличается высокой интенсивностью деградации органических веществ (в 2 раза быстрее), что позволяет сократить требуемый объем сооружений вдвое).

I. Расчет метантенка, работающего в условиях мезофильного сбраживания

Температура внутри аппарата при условии мезофильного сбраживания — 33°C.

Исходя из влажности осадка 95%, суточная доза смеси, загружаемой в аппарат, — $D_{\text{мт}} = 8\%$ (табл. 59 [11]).

Рассчитываем объем метантенка [15]:

$$V_{\text{мет}} = \frac{M_{\text{общ}} \cdot 100}{D_{\text{мт}}}, \text{ м}^3; \quad (3.15)$$

$$V_{\text{мет}} \approx 58 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

Исходя из необходимого объема метантенков, принимаем шесть аппаратов. Выбранные метантенки имеют следующие характеристики:

$D = 18$ — диаметр аппарата, м;

$V_{\text{пол}} = 6 \cdot 10^3$ — полезный объем аппарата, м³;

$H_{\text{В.К}} = 3,15$ — высота верхней конической части аппарата, м;

$H_{\text{ц}} = 18$ — высота аппарата в его цилиндрической части, м.

Фактическая доза загрузки метантенка определяется по формуле

$$D_{\Phi} = \frac{V_{\text{мет}} \cdot D_{\text{мт}}}{V_{\Phi} \cdot n}, \%; \quad (3.16)$$

$$D_{\Phi} = 17,5\%.$$

Процент распада беззольного вещества в метантенке определяется по формуле

$$R_{\text{без}} = \frac{53 \cdot Q_{\text{без}} + 44 \cdot U_{\text{без}}}{M_{\text{без}}} - n \cdot D_{\text{мт}}, \% , \quad (3.17)$$

где $a_{\text{см}} = 53$ (так как отсутствуют данные о химическом составе сырого осадка) — предел сбраживания беззольного вещества загружаемого осадка, %. [100]; $n = 0,72$ — безразмерный коэффициент, характеризующий процесс сбраживания и зависящий от влажности осадка; $D_{\text{мт}}$ — суточная доза загрузки метантенков, %.

$$R_{\text{без}} = 43,43\%.$$

Выход газа из метантенков

$\rho = 1 \text{ кг/м}^3$ — плотность газа на выходе из метантенка.

Для расчета объема газа, собираемого с одного метантенка в сутки, воспользуемся формулой

$$\Gamma' = \frac{\frac{R_{\text{без}}}{100 \cdot \rho} M_{\text{без}} \cdot 10^3}{n}, \text{ м}^3/\text{сут}; \quad (3.18)$$

$$\Gamma' \approx 14\,000 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Для хранения собираемого с метантенков газа необходимо предусмотреть газгольдеры. Расчёт вместимости аппаратов принимаем исходя из 2,5-часового выхода газа:

$$W_{\text{газ}} = \frac{\Gamma \cdot \tau}{24}, \text{ м}^3; \quad (3.19)$$

$$W_{\text{газ}} = 9 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

Исходя из полученного объема, выбираем 2 газгольдера 707-2-6 со следующими характеристиками:

- емкость аппарата — 3000 м^3 ;
- диаметр аппарата — 21 м.

Для определения диаметра горловины аппарата воспользуемся формулой

$$D_{\text{гор}} = 2 \cdot \sqrt[2]{\frac{\Gamma'}{Q_{\text{г}}} \cdot \pi^{-1}}, \text{ м}, \quad (3.20)$$

где $Q_{\text{г}} = 700$ — пропускная способность горловины, $\text{м}^3/\text{сут}$ на м^2 .

$$D_{\text{гор}} = 5 \text{ м}.$$

Общее потребное количество пара для обогрева может быть определено благодаря формуле (3.21):

$$G_{\text{п}} = \frac{[(1+K) \cdot M_{\text{общ}} \cdot C_{\text{т}} \cdot (t_{\text{сб}} - t_{\text{вход}}) + V_{\text{мг}} - M_{\text{общ}}] \cdot 10^3}{\eta \cdot 550}, \text{ т/сут}, \quad (3.21)$$

где $K = 0,10$ — безразмерный коэффициент, характеризующий потери тепла метантенков через стенки, днище и перекрытие; $C_{\text{т}} = 4,19$ — тепловая мощность осадка в метантенке, выражается в кДж/(кг·К); $t_{\text{сб}} = 30$ — температура в аппарате, выражается в °С; $t_{\text{вход}} = 15$ — температура осадка на входе в аппарат, выражается в °С; $\eta = 0,75$ — коэффициент полезного действия котельной установки. Теплоотдачу 1 кг пара будем считать равной 550 ккал.

$$G_{\text{п}} = 1385,6 \text{ т/сут.}$$

Если принять теплопроводную способность газа равной $5 \cdot 10^3$ ккал/м³, то получаемое количество тепла при сжигании газа может быть определено по формуле

$$G'_{\text{т}} = G \cdot 5 \cdot 10^3, \text{ ккал/сут}; \quad (3.22)$$

$$G'_{\text{т}} = 430 \cdot 10^6, \text{ ккал/сут.}$$

Так как $G'_{\text{т}} < G_{\text{расч}}$, то получаемого при сжигании газа тепла не хватит для поддержания мезофильного процесса в метантенках.

Массу образуемого за сутки сухого вещества сброженной смеси можно рассчитать по формуле

$$M'_{\text{сух}} = (M_{\text{сух}} - M_{\text{без}}) + M_{\text{без}} \cdot (1 - y), \text{ т/сут}; \quad (3.23)$$

$$M'_{\text{сух}} = 145 \text{ т/сут.}$$

Расчёт влажности и зольности сброженной смеси производился по формулам (3.24) и (3.25) соответственно:

$$B'_{\text{см}} = 100 \left(1 - \frac{M'_{\text{сух}}}{M_{\text{общ}}} \right), \text{ } \%; \quad (3.24)$$

$$B'_{\text{см}} = 98\%;$$

$$Z'_{\text{см}} = 100 - \frac{M'_{\text{без}} \cdot 10^4}{M'_{\text{сух}} (100 - B''_{\text{г}})}, \text{ } \%; \quad (3.25)$$

$$Z'_{\text{см}} = 16\%,$$

где $B''_{\text{г}} = 6$ — гигроскопичность сброженной смеси, выражается в % [98].

II. Расчет метантенка, работающего в условиях термофильного сбраживания

Условия протекания процесса:

- температура — $50\text{--}55^\circ\text{C}$;
- влагосодержание смеси в метантенке — 95% ;
- суточная дозировка смеси — $D_{\text{мл}} = 17\%$;
- объем метантенков (расчетный) — $V'_{\text{мет}} \approx 37 \cdot 10^3 \text{ м}^3$.

Исходя из этих условий, принимаем три метантенка со следующими характеристиками:

- диаметр — $D = 18 \text{ м}$;
- полезный объем — $6 \cdot 10^3 \text{ м}^3$;
- высота верхней конической части аппарата — $H_{\text{в.к}} = 3,15 \text{ м}$;
- высота аппарата в его цилиндрической части — $H_{\text{ц}} = 18 \text{ м}$;
- доза загрузки (фактическая) — $D_{\text{ф}} = 34,9\%$;
- коэффициент, характеризующий влажность осадка и зависящий от режима сбраживания, — $n = 0,31$ [99].

Исходя из характеристик аппарата, распад беззольного вещества в метантенке будет равен $R_{\text{бсз}} = 38\%$.

Выход газа из метантенков

$\rho = 1 \text{ кг/м}^3$ — плотность газа на выходе из метантенка.

Для расчета объема газа, собираемого с одного метантенка в сутки, воспользуемся формулой (3.18):

$$\Gamma' \approx 25,5 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Для хранения собираемого с метантенков газа необходимо предусмотреть газгольдеры. Расчёт вместимости аппаратов принимаем исходя из 2,5-часового выхода газа:

$$W_{\text{газ}} \approx 8 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

Исходя из полученного объема, выбираем 2 газгольдера 707-2-6 со следующими характеристиками:

- емкость аппарата — $3 \cdot 10^3 \text{ м}^3$;
- диаметр аппарата — 21 м .

Для определения диаметра горловины аппарата воспользуемся формулой (3.20):

$$D_{\text{гор}} = 6,8 \text{ м.}$$

Необходимое количество тепла для обогрева свежего осадка:

$$G_{об} = (1 + K) \cdot M_{общ} \cdot C_T \cdot (t_{сб} - t_{вх}) \cdot 10^3, \text{ ккал/сут}, \quad (3.26)$$

где $K = 0,10$ — безразмерный коэффициент, характеризующий потери тепла метантенков через стенки, днище и перекрытие; $C_T = 4,19$ — тепловая мощность осадка в метантенке, выражается в кДж/(кг·К); $t_{сб} = 30$ — температура в аппарате, выражается в °C; $t_{вх} = 15$ — температура осадка на входе в аппарат, выражается в °C.

$$G_{об} = 9,5 \cdot 10^8 \text{ ккал/сут.}$$

Компенсация потерь тепла всего объема аппарата равна (охлаждение принимается за сутки на 1°С):

$$G_{ох} = 1,2 \cdot 10^7 \text{ ккал/сут.}$$

Общее количество потребляемого тепла:

$$G_T = 96,2 \cdot 10^7 \text{ ккал/сут.}$$

Необходимая расчетная производительность по вырабатываемому теплу с учетом коэффициента полезного действия котельной установки:

$$G_{расч} \approx 120 \cdot 10^7 \text{ ккал/сут.}$$

Принимая, что теплоотдача 1 кг пара равна 550 ккал, расчетное количество пара

$$G_{п} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ т/сут.}$$

Если принять теплопроводную способность газа равной $5 \cdot 10^4$ ккал/м³, то получаемое количество тепла при сжигании газа

$$G'_T \approx 38 \cdot 10^7 \text{ ккал/сут.}$$

Масса образуемого за сутки беззольного вещества рассчитывается по формуле (3.22):

$$M'_{без} = 110 \text{ т/сут.}$$

Массу образуемого за сутки сухого вещества сброженной смеси можно рассчитать по формуле (3.23):

$$M'_{сух} = 150 \text{ т/сут.}$$

Расчёт влажности и зольности сброженной смеси производился по формулам (3.24) и (3.25) соответственно:

$$B'_{см} = 95\%;$$

$$Z'_{см} = 18\%.$$

3.4. Механическое обезвоживание осадков из пульпы органических отходов легкой промышленности

Направляемые на механическое обезвоживание осадки городских сточных вод необходимо подвергать предварительной обработке, заключающейся в уплотнении и промывке. Сброженный осадок перед обезвоживанием в фильтр-прессах направляется на очистку водой технического качества.

Необходимое для очистки количество технической воды принимается, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

- для сброженных стоков в мезофильном режиме — $n = 2-3$;
- для сброженных стоков в термофильном режиме — $n = 3-4$;
- необходимое время промывки принимают равным

$T_{\text{пр}} = 25$ мин.

Исходя из описанных выше условий, объем смеси осадка и промывной воды, потребляемой за сутки, рассчитывается по формулам (3.27) и (3.28) соответственно:

$$W_{\text{см}} = V_{\text{общ}}(1 + n), \text{ м}^3; \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{см}} &\approx 25 \cdot 10^3 \text{ м}^3; \\ W_{\text{пр}} &= \frac{V_{\text{общ}} \cdot T_{\text{пр}} (1 + n)}{1440}, \text{ м}^3; \\ W_{\text{пр}} &= 260 \text{ м}^3. \end{aligned} \quad (3.28)$$

На основе полученных данных выбираем два резервуара. Рабочий объем каждого резервуара равен 160 м^3 .

Барботирование смеси осадка и воды для промывки осуществляется сжатым воздухом. Необходимое количество сжатого воздуха определяется из расчета $0,5 \text{ м}^3$ на 1 м^3 смеси.

Объем необходимого для перемешивания воздуха принимаем равным $V = 520 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Смесь промытого осадка и воды уплотняются в отстойниках-уплотнителях. В случае выбора уплотнителей радиального типа время, необходимое для уплотнения, принимается равное 15 ч, а количество уплотнителей — 2.

Необходимый объем уплотнителя рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} W_{\text{упл}} &= 0,625 \cdot W_{\text{см}}; \\ W_{\text{упл}} &\approx 15,8 \cdot 10^3 \text{ м}^3. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Так как влажность осадка 95%, а время хранения составляет не более двух суток, то необходимый объём иловой части уплотнителя:

$$W_{\text{ил}} = 7,5 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

Следовательно общий объём всех уплотнителей:

$$W_{\text{общ}} = 23,3 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

Для промытого осадка принимаем 2 первичных отстойника, выстушающих в качестве уплотнителей:

- радиус каждого аппарата $R = 15 \text{ м}$;
- необходимый объём каждого аппарата $V = 3,5 \cdot 10^3 \text{ м}^3$;
- влажность смеси промытого и уплотнённого осадка принимаем равной 94%.

Тогда расход смеси:

$$W_{\text{ос}} = 3,8 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Количество сливной воды уплотнителей осадка рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{сл}} = W_{\text{см}} - W_{\text{ос}}. \quad (3.30)$$

$$Q_{\text{сл}} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

При обработке осадков городских сточных вод коагулянтom в качестве реагента принимаем FeCl_3 или $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ и CaO в виде 10%-ных растворов.

Расход хлорида железа в сутки составит

$$Q_{\text{FeCl}_3} = 91,5 \cdot 0,04 = 3,66 \text{ т/сут.}$$

Так как 30%-ный раствор хлорида железа хранится в емкостях $\tau = 20 \text{ сут.}$, то необходимый их объём равен:

$$V_{\text{рез.FeCl}_3} = \frac{Q_{\text{FeCl}_3} \cdot 100}{30 \cdot 1,57} \cdot \tau, \text{ м}^3; \quad (3.31)$$

$$V_{\text{рез.FeCl}_3} = 155 \text{ м}^3.$$

Объём 10%-ного раствора хлорида железа, необходимый на сутки, равен:

$$V'_{\text{рез.FeCl}_3} = \frac{Q_{\text{FeCl}_3} \cdot 10}{1,19} \cdot \tau, \text{ м}^3 \quad (3.32)$$

$$V'_{\text{рез.FeCl}_3} = 30 \text{ м}^3.$$

Расход СаО по активной части, необходимый на сутки, равен:

$$Q_{\text{СаО}} = 91,5 \cdot 0,11 = 10,1 \text{ т/сут.}$$

Объём 10%-ного раствора извести, необходимый на сутки, равен

$$V'_{\text{СаО}} = \frac{Q_{\text{СаО}} \cdot 10}{1,075} \cdot \tau, \text{ м}^3; \quad (3.33)$$

$$V'_{\text{СаО}} = 95 \text{ м}^3.$$

Исходя из полученных данных, количество расходных баков принимаем равным 4, объём каждого — 40 м^3 , а общий объём — 160 м^3 .

Для определения рабочей площади вакуум-фильтра воспользуемся формулой

$$F = \frac{10W_{\text{ос}}(100 - P_{\text{о}})}{q \cdot T}, \text{ м}^2, \quad (3.34)$$

где $W_{\text{ос}}$ — количество направляемой на обезвоживание смеси, $\text{м}^3/\text{сут}$; $P_{\text{о}}$ — влагосодержание осадка после вакуум-фильтра, %; Q — пропускная способность вакуум-фильтра, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; T — время работы вакуум-фильтра за сутки, ч.

$$F = 525 \text{ м}^2.$$

Исходя из полученных данных, принимаем шесть вакуум-фильтров, из которых четыре рабочих и 2 резервных.

Площадь поверхности вакуум-фильтров принимаем 300 м^2 .

Количество твёрдых частиц, оставшихся на фильтрующей поверхности, составляет

$$W_k = 450 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Тогда количество образующегося на вакуум-фильтрах фильтрата равно

$$Q_{\text{ф}} = 3,3 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

3.5. Обеззараживание осадков сточных вод из пульпы органических отходов легкой промышленности

Для химического обеззараживания осадков после механического обезвоживания применяем СаО, так как в осадке остается большое количество болезнетворных микроорганизмов. В процессе гашения извести на 1 грамм-моль СаО выделяется $65 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ тепла [76].

Количество тепла, которое необходимо для нагрева осадка СаО, определяется формулой (3.35):

$$Q_{н.о} = \left[M_{ос} \cdot 1,8 \cdot (1 + C_{сух.о} P_{ос}) + \frac{C_{ос} \cdot \Delta T}{1152 \cdot \alpha - C_{и} \cdot \Delta T} C_{и} \right] \cdot \Delta T, \text{ кДж/сут, (3.35)}$$

где $M_{ос}$ — масса осадка, кг; $M_{и}$ — масса СаО, кг; $C_{и} = 0,92$ — удельная тепловая мощность СаО, кДж/(кг·град) [77]; ΔT — разница между исходной температурой и температурой, требуемой для дезинфекции осадка, °С; $C_{сух.о} = 1,8$ — тепловая мощность сухого осадка, кДж/(кг·град) [77]; $W_{сух.о} = 5-10$ — влажность сухого осадка, %; $P_{ос}$ — влажность осадка, измеряемая в долях единиц; α — активность извести, измеряемая в долях единиц.

$$Q_{н.о} = 6,2 \cdot 10^6 \text{ кДж/сут.}$$

По расчетным данным было произведено сравнение нагрузок на водоочистные сооружения при очистке стандартных сточных вод и сточных вод, в состав которых добавлены дробленые органические отходы легкой промышленности (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Сравнение нагрузок на городские водоочистные сооружения

Показатели	При обычных условиях эксплуатации	При использовании шарошечных измельчителей	Увеличение нагрузки, %
Сырой осадок, м ³ /сут	5220	5800	11
Избыточный активный ил, м ³ /сут	16 605	19 534	17,6
Химический ил, м ³ /сут	450	500	11
Количество жидкости, отделяемой в процессе уплотнения, м ³ /сут	2065 14 820	2320 17 230	12 16
Расчёт метантенка при мезофильном сбраживании			
Зольность, %	15	17	13,3
Влажность, %	96	97	1,1
Масса сухого вещества, т/сут	130	146	12
Масса беззольного вещества, т/сут	1050	1174	11,8
Расчёт метантенка при термофильном сбраживании			
Зольность, %	13	16	23
Влажность, %	90,5	94,6	4,5

Показатели	При обычных условиях эксплуатации	При использовании шарошечных измельчителей	Увеличение нагрузки, %
Расчёт метантенка при термофильном сбраживании			
Масса сухого вещества, т/сут	130	142	9,2
Масса беззольного вещества, т/сут	101	112	10,9
Общий объем уплотнителей, м ³	20 230	23 254,5	14,8
Расход образующегося фильтрата, м ³ /сут	2830	3300	16,6

По результатам проведенных расчетов и сравнений можно говорить о том, что данный аппарат и предлагаемая технология безопасна для районов канализационных сетей и городских очистных сооружений [78], так как увеличение нагрузки на водоочистные сооружения незначительно.

Сокращение образования NH_4 и CO_2 благоприятно скажется на экологической безопасности полигона, а также качестве окружающей среды прилегающих к нему территорий.

Глава 4

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Инженерная методика масштабирования шарошечных измельчителей пищевых отходов

Полученные в предыдущих главах результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований позволяют разработать методику проектирования систем с использованием пульповой переработки пищевых отходов в канализационных системах жилых домов. Совокупность исследованных стадий процесса пульповой переработки пищевых отходов позволяет характеризовать его как безотходный технологический процесс переработки пищевых отходов. При этом необходимо отметить, что подобные процессы переработки пищевых отходов на сегодняшний день в нашей стране фактически отсутствуют. По этой причине нет научного обоснования методики проектирования подобных процессов, а созданные технологии опираются на эмпирический опыт и аналогии с западными технологиями.

При разработке и выборе соответствующего оборудования исходными данными являются физико-механические характеристики пищевых отходов, их фракционный состав, содержание в них загрязняющих примесей, требования, предъявляемые к качеству сбросов и производительность по готовому продукту. Кроме этих требований могут быть заданы дополнительные условия, связанные с конкретными особенностями создаваемой модели. В частности, если разрабатываемая технологическая линия привязывается к основному производству, т. е. к действующему предприятию, например по переработке мясной продукции, создавая тем самым безотходное или малоотходное производство за счет включения отходов основного производства в технологический цикл предприятия, то для проектируемой линии предпочтителен выбор оборудования с большими мощностями и скоростью переработки отходов производства.

Иными словами, для промышленного внедрения представленные выше результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований необходимо масштабировать. С этой целью методами теории подобия и размерностей проведем обобщение результатов экспериментальных исследований изложенных выше, в виде безраз-

мерных комплексов измеряемых величин процесса и физико-химических свойств очищаемой среды. Как известно, процессы переноса массы подобны в случае подобия распределения в сходственных точках аппарата профилей скоростей и концентраций [84].

Анализ влияния действующих факторов при измельчении пищевых отходов проведем путем составления соотношений из безразмерных комплексов на основе методов теории подобия с применением π -теоремы. Традиционно применяемые методы получения критериальных соотношений на основе физико-математических моделей, основанных на дифференциальных уравнениях переноса, в рассматриваемой задаче требуют столь большого числа допущений, что полученные результаты в лучшем случае носят качественный характер и для прикладных задач не могут быть использованы непосредственно. Учитывая сложность получения критериальных соотношений, в данной работе методы теории подобия и размерностей были дополнены методами регрессионного анализа, так, как это было предложено в работе [85, 86].

Общее количество безразмерных комплексов, полученных с помощью разработанной программы по формальным признакам сокращения размерностей до нулевой, составило 23.

Программная обработка экспериментальных данных позволила получить набор значимых безразмерных параметров, сконструированных из числа измеряемых величин, табличных и литературных данных:

$$\Pi_1 = \frac{\Delta C}{C_H} \text{ — эффективность дробления пищевых отходов, где}$$

C_H — измеряемый средний линейный размер частиц перед дроблением; ΔC — измеряемая разница между начальным и конечным средним линейным размером частиц перед дроблением и после него C_K ;

$$\Pi_2 = \frac{\rho \cdot \omega^2}{\Delta P} \text{ — критерий Эйлера } Eu, \text{ показывает отношение сил}$$

давления в потоке воды к силам инерции;

$$\Pi_3 = \frac{\rho \cdot \omega \cdot D}{\mu} \text{ — критерий Рейнольдса } Re_w, \text{ показывает отноше-}$$

ние сил инерции к силам трения потока воды; D — средний диаметр рабочей камеры шарошечной дробилки;

$\Pi_4 = \frac{\rho \cdot \omega \cdot d}{\mu}$ — критерий Рейнольдса Re_p — показывает отно-

шение сил инерции к силам трения для средней по размерам частицы, диаметром d в камере измельчителя;

$\Pi_5 = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d}{v^2 \rho}$ — критерий Ричардсона Ri , показывает отноше-

ние потенциальной энергии частиц пищевых отходов, погружённых в воду, к их кинетической энергии в камере измельчения, где ρ — усредненная плотность частиц пищевых отходов; $\Delta\rho$ — разность плотностей частиц и воды; g — ускорение свободного падения; d — характерный средний размер частицы в камере измельчения; v — характерная скорость частиц в камере измельчения. Как известно, для значений Ri , меньших 1, сила Архимеда не играет существенной роли для двухфазного течения, а при Ri , больших 1, сила плавучести доминирует, в том смысле, что коактивного расслоения среды не происходит.

Порогом значимости любого комплекса была выбрана величина 10^{-3} , т. е. $\Pi_i > 10^{-3}$ считались значимыми членами линейного регрессионного уравнения.

Обработка экспериментальных данных в форме безразмерных комплексов по описанной методике, использованной для аналогичных задач в работах [85, 87], дала уравнение

$$\text{Эф} = 0,352 \cdot Eu^{0,17} \cdot Ri^{0,33} \cdot Re_p^{0,25} \cdot Re_{\text{ш}}^{0,25}, \quad (4.1)$$

где $\text{Эф} = (C_n - C_k)/C_n \equiv \Pi_1$.

Таким образом, полученное соотношение содержит только критерии гидродинамического подобия, а посему может быть с полным основанием отнесено к виду критериальных уравнений [120]. При этом формальный алгоритм получения соотношений для безразмерных комплексов привел к получению физически обоснованного результата без использования априорных предположений об их структуре. Но в то же время количество безразмерных комплексов в полученном соотношении не превосходит задаваемого π -теоремой количества критериев подобия. Этот результат показывает, что уравнение (4.1) позволяет с приемлемой точностью разрабатывать технологические процессы и масштабировать шарошечные измельчители пищевых отходов для различных производственных условий: жилой

дом, предприятие общественного питания, предприятие пищевой промышленности.

Диапазоны изменения безразмерных комплексов составляли:

$\text{Эф} = \text{от } 0,7 \text{ до } 0,97$;

$\text{Eu} = \text{от } 0,004 \text{ до } 4,15$;

$\text{Re}_w = \text{от } 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ до } 9,7 \cdot 10^{-5}$;

$\text{Re}_p = \text{от } 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ до } 9,7 \cdot 10^{-5}$;

$\text{Ri} = \text{от } 0,1 \text{ до } 2,06$.

Погрешность уравнения (4.1) по отношению к экспериментальным данным, изложенным выше, составляет $\pm 11\%$ во всем диапазоне изменения экспериментальных параметров процесса.

4.2. Расчет конструктивных параметров шарошечных измельчителей

Так как самыми прочными отходами в составе пищевых отходов являются кости, то расчёт максимальной мощности аппарата будет производиться в зависимости от их прочности.

Предел прочности костей употребляемых в пищу животных составляет $\delta_{\text{сж, max}} = 0,0428 \text{ Па}$ [88], модуль упругости дробимого материала $E = 39,5 \text{ Па}$, КПД используемой передачи привода $\eta = 0,9$. Исходя из этих условий, можно определить мощность привода измельчителя [44]:

$$N = 10^{-3} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \delta_{\text{сж}}^2 \cdot D_{\text{в}} \cdot n}{12 \cdot E \cdot \eta} (D_{\text{max}}^2 - d_1^2), \text{ кВт}, \quad (4.2)$$

где D_{max} и d_1 — соответственно диаметры наибольших кусков, оступающих в измельчитель и выходящих из него, м; $d_1 = (1,4-2,2)b$ и определяется по типовой характеристике крупности дробления; n — частота вращения эксцентриковой втулки измельчителя, вычисляемая по формуле

$$n = 0,55 \frac{\sqrt{\sin \beta + f \cdot \cos \beta}}{D_b}, \text{ об/с}, \quad (4.3)$$

где D_b — наибольший диаметр дробящего конуса, м; f — коэффициент трения материала о поверхность конусов, $f = 0,55$ [121]; β — угол наклона образующей, дробящего конуса в зоне параллельности, $\beta = 34-41^\circ$ [122].

$$n = 0,55 \frac{\sqrt{\sin 20 + 0,35 \cdot \cos 20}}{0,11} \quad \text{или} \quad n = 4,1 \text{ об/с.}$$

Тогда

$$N = 10^{-3} \cdot \frac{3,14^2 \cdot 0,0428^2 \cdot 0,13 \cdot 4,1}{12 \cdot 39,5 \cdot 0,9} (0,01^2 - 0,0025^2), \text{ кВт;}$$

$$N = 212\text{--}320 \text{ Вт.}$$

Как видно из расчёта, мощность двигателя колеблется в диапазоне от 0,21 до 0,32 кВт.

Отнеся данный диапазон мощностей двигателя измельчителя пищевых отходов к объемам перерабатываемых отходов, получаем диаграмму мощностей измельчителя в зависимости от мощности на рисунке 4.4.

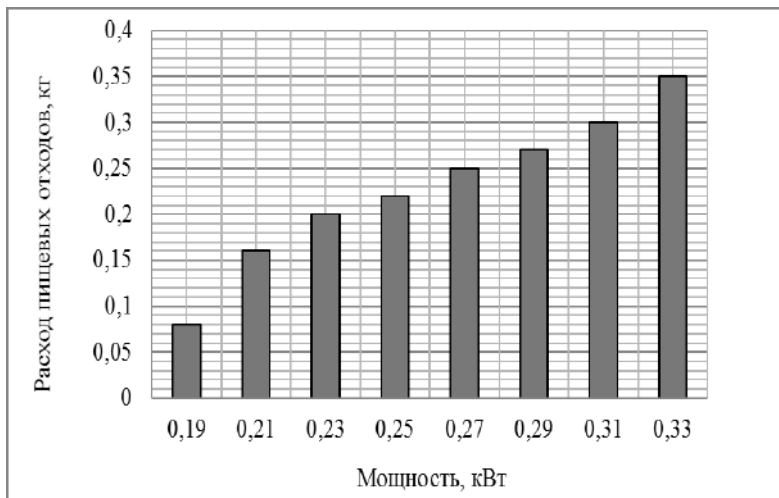


Рис. 4.1

Диаграмма зависимости мощности двигателя от расхода смешанных пищевых отходов

Так как для полноценной работы аппарата необходима вода, то зависимость расхода воды от количества перерабатываемых пищевых отходов представлена на рисунке 4.2.

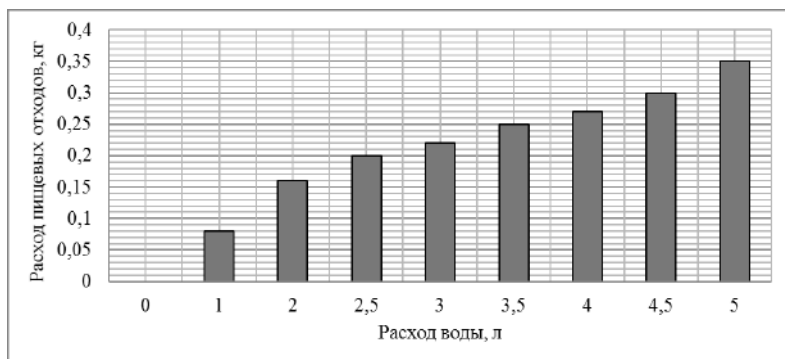


Рис. 4.2

Зависимость расхода воды от количества перерабатываемых пищевых отходов

Блок-схема процесса пульповой переработки пищевых отходов в канализационных системах жилых домов выглядит следующим образом:

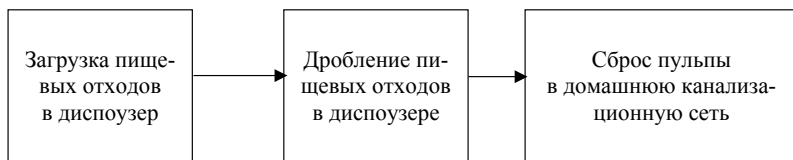


Рис. 4.3

Технологическая блок-схема процесса пульповой переработки пищевых отходов в канализационных системах жилых домов

Исходя из полученных данных, можно составить типоразмерный ряд моделей, которые могут быть использованы для переработки пищевых отходов в жилых домах. Основными параметрами, характеризующими определенную модель измельчителя пищевых отходов, являются потребляемая мощность, количество перерабатываемых отходов, частота вращения измельчающего конуса, а также габаритные размеры. Всё это отражено в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Типоразмерный ряд предлагаемых моделей измельчителя

№ п/п	Ско- рость враще- ния ко- нуса, об/мин	Потреб- ляемая мощ- ность (max), Вт/ч	Количес- тво перера- батывае- мых отхо- дов, кг/с	Габаритные размеры аппарата, мм				
								
1	2600	475	0,068	A	B	C	D	E
2	2600	490	0,087	355	165	70	121	120
3	2700	520	0,098	376	184	70	180	135
4	2800	585	0,115	379	190	70	190	142
				440	194	100	194	145

4.3. Предложения по удалению пульпы пищевых отходов через канализационные системы предприятий общественного питания

В случае использования измельчителей пищевых отходов на предприятиях общественного питания стоит учитывать высокие нагрузки на аппарат, фактическую непрерывность работы и скорость измельчения пищевых отходов.

В этих условиях КПД передачи привода $\eta = 0,92$. Тогда мощность аппарата определяется как

$$N = 10^{-3} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \delta_{\text{сж}}^2 \cdot D_{\text{в}} \cdot n}{12 \cdot E \cdot \eta} (D_{\text{max}}^2 - d_1^2), \text{ кВт}, \quad (4.4)$$

где D_{max} и d_1 — соответственно диаметры наибольших кусков, поступающих в измельчитель и выходящих из него, м; $d_1 = (1,4-2,2)b$ и определяется по типовой характеристике крупности дробления; n — частота вращения эксцентриковой втулки, вычисляемая через формулу

$$n = 0,55 \frac{\sqrt{\sin \beta + f \cdot \cos \beta}}{D_b}, \text{ об/с}, \quad (4.5)$$

где D_b — наибольший диаметр дробящего конуса, м; f — коэффициент трения материала о поверхность конусов, $f = 0,35$; β — угол наклона образующей, дробящего конуса в зоне параллельности, $\beta = 34\text{--}41^\circ$.

$$n = 0,55 \frac{\sqrt{\sin 34 + 0,55 \cdot \cos 34}}{0,11};$$

$$n = 5,03 \text{ об/с.}$$

Тогда

$$N = 10^{-3} \cdot \frac{3,14^2 \cdot 0,064^2 \cdot 0,13 \cdot 5,03}{12 \cdot 45,6 \cdot 0,92} (0,01^2 - 0,0025^2), \text{ кВт};$$

$$N = 340\text{--}490 \text{ Вт.}$$

Как видно из расчёта, мощность двигателя колеблется в диапазоне от 0,34 до 0,49 кВт. Отнеся данный диапазон мощностей двигателя измельчителя пищевых отходов к объемам перерабатываемых отходов с учетом образования отходов, получаем следующую диаграмму, изображенную на рисунке 4.4.

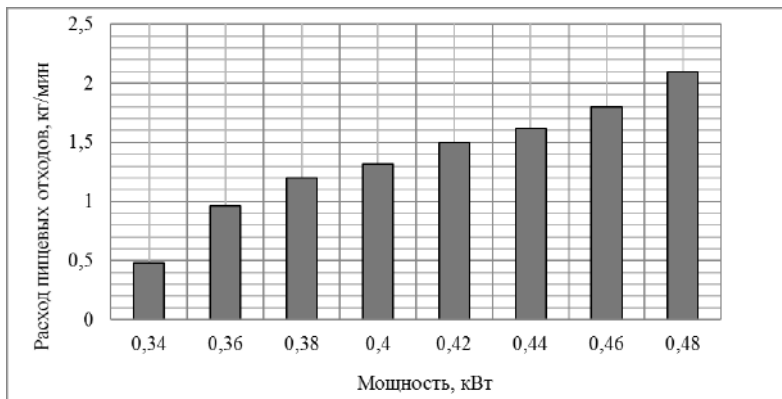


Рис. 4.4

Диаграмма зависимости мощности двигателя от количества пищевых отходов

Блок-схема процесса пульповой переработки пищевых отходов в канализационных системах жилых домов выглядит следующим образом:

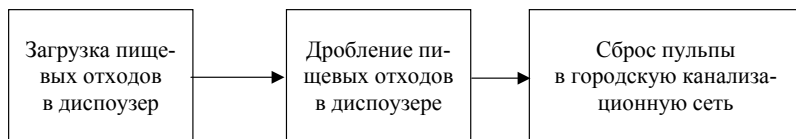


Рис. 4.5

Технологическая блок-схема процесса пульповой переработки пищевых отходов в канализационных системах жилых домов

Учитывая, что норма накопления пищевых отходов на одно посадочное место предприятия общественного питания составляет 142,0 кг/год или 0,38 кг/день, то для среднего кафе численностью в 100 посадочных мест и пропускной способностью в день около 550 человек получаем 210 кг пищевых отходов ежедневно. В таких условиях с вышезаданной пропускной способностью заведения общественного питания необходимо поставить 2 диспозера для нормальной работы.

Как говорилось выше, для правильной работы аппарата необходима вода, поэтому была просчитана зависимость расхода воды от количества перерабатываемых пищевых отходов и построена диаграмма этой зависимости, представленная на рисунке 4.6.

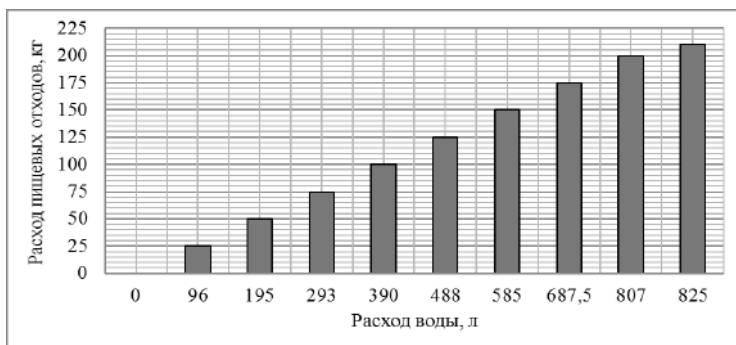


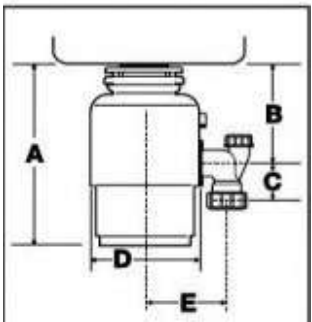
Рис. 4.6

Зависимость расхода воды от количества перерабатываемых пищевых отходов

Для предприятий общественного питания типоразмерный ряд измельчителя представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2

**Типоразмерный ряд моделей диспоузеров
(размеры указаны в мм)**

	A	636	615	590
	B	336	336	336
	C	128	128	128
	D	370	346	318
	E	262	262	262

4.4. Предложения по удалению пульпы пищевых отходов через канализационные системы предприятий пищевой промышленности

Предлагаемый способ утилизации пищевых отходов можно осуществлять применительно не только к жилым домам и предприятиям общественного питания, но и к предприятиям пищевой промышленности. Наличие данного технологического оборудования на производстве поможет не только решить проблему образования большого количества пищевых отходов, образующихся в процессе функционирования предприятия, но и получить от этого экономическую выгоду.

Использование данного аппарата совместно с метантенками позволит предприятию вырабатывать электроэнергию для собственных нужд. Произведём расчёт примерного количества метана, которое может образоваться на предприятии мясоперерабатывающей промышленности за сутки. Принимаем равным 1 г на 1 г распавшегося беззольного вещества осадка (пульпы). Плотность газа $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$.

Удельный выход газа по формуле составит

$$y = \frac{R_{\text{без}}}{100 \cdot \rho}, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (4.6)$$

$$y = 0,43 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Суммарный выход газа определяется по формуле

$$\Gamma = y \cdot M_{\text{без}} \cdot 1000, \text{ м}^3/\text{сут}; \quad (4.7)$$

$$\Gamma = 86\,000 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Съем газа с одного метантенка в сутки по формуле

$$\Gamma' = \frac{\Gamma}{n}, \text{ м}^3/\text{сут}; \quad (4.8)$$

$$\Gamma' = 14\,333 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Для предлагаемого диспозера был проведен ряд экспериментальных исследований зависимости крупности дробленых фракций пищевых отходов от мощности двигателя.

Это позволило наглядно показать применимость предлагаемой конструкции диспозера к предприятиям пищевой промышленности. Был устранен недостаток с заклиниванием аппарата при дроблении крупных костей и выход его из строя при измельчении волокнистых и жирных компонентов пищевых отходов.

Блок-схема процесса пульповой переработки пищевых отходов в канализационных системах жилых домов выглядит следующим образом:

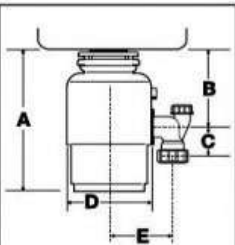


Рис. 4.7

Технологическая блок-схема процесса пульповой переработки пищевых отходов в канализационных системах жилых домов

Для предприятий пищевой промышленности типоразмерный ряд предлагаемого диспозера представлен в таблице 4.3.

**Типоразмерный ряд моделей диспозеров
(размеры указаны в мм)**

	A	688	624
	B	370	342
	C	128	128
	D	468	410
	E	336	262

4.5. Сравнительный технико-экономический анализ автомобильной транспортировки пищевых отходов в составе ТБО и канализационного удаления после пульповой переработки

Из блок-схем, представленных на рисунках 4.3, 4.4 и 4.7, видно, что из процесса утилизации пищевых отходов исключен этап автомобильной транспортировки отходов от мест их образования до места переработки. Зависимость количества вредных выбросов от автотранспортных перевозок от количества перевозимых отходов можно видеть на рисунке 4.8.

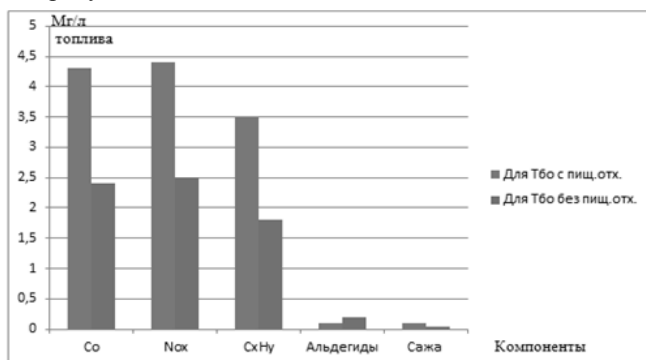


Рис. 4.8

*Количество выбросов автотранспорта, перевозящего
сортированные и несортированные ТБО*

Исключение этапа автотранспортирования пищевых отходов позволяет не только сократить экономические затраты на перевозку ТБО, но и уменьшает негативное воздействие на окружающую среду и загрязнение рекреационных зон города (табл. 4.4).

Таблица 4.4

**Снижение транспортной загруженности г. Москвы
при использовании пульповой переработки пищевых отходов**

Район г. Моск- вы	Количество ТБО, образуемого в адми- нистративных окру- гах за сутки [85], кг	Количество машин на маршруте	
		Вывоз пищевых отходов в составе ТБО	Канализационное удаление пульпы пищевых отходов
ЦАО	518 586	28	20
САО	776 500,84	41	29
СВАО	6928,04	36	25
ВАО	10 528,81	55	38
ЮВАО	7994,06	42	29
ЮАО	8960,56	47	33
ЮЗАО	7572,63	39	27
ЗАО	10 406,33	54	38
СЗАО	6343,11	33	23
ЗелАО	2529,60	13	9

Глава 5

ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ В БИОТЕХНОЛОГИЯХ И ГЕЛЯХ

5.1. Микробиореактор для культивирования стволовых клеток

На основе точного решения задачи конвективной дисперсии примеси, выделяемой точечным источником в инфильтруемой среде с поглощением, построено однопараметрическое семейство замкнутых, вложенных друг в друга областей, ограниченных изоконцентра-тами. Полученные результаты предполагается использовать при проектировании проточных микробиореакторов для искусственного культивирования (*in vitro*) клеточных культур.

Проблема аппаратного культивирования стволовых клеток, могущих служить исходным материалом регенерации тканей путём клеточной терапии, является одной из важных современных проблем мировой медико-биологической науки. Способность стволовых клеток к размножению, самоподдержанию и дифференцировке, а также возможность трансплантации аллогенных (донорских) клеток при клеточной терапии некоторых патологических состояний организма, например в кардиологии, неврологии, онкологии, делает перспективным развитие теории и практики их искусственного (*in vitro*) культивирования [123]. Кроме того, дифференцировка стволовых клеток, являющаяся главной частью морфогенеза и происходящая под влиянием механохимических воздействий [124], может быть удобнее всего осуществлена в искусственном проточном микробиореакторе (хемостате) с контролируемыми режимами работы [3, 4]. Известно, что клетки чувствительны как к концентрации питательных веществ, так и к слабым тангенциальным напряжениям (0,5–1,0 Па), создаваемым жидкостью в среде [127].

Иммобилизация клеточных культур в хемостате осуществляется на специальном геле — нанопористой среде, армированной кросслинкером — длинными цепными полимерными молекулами. Эта среда обладает упруго-вязкой реологией, пористостью, проницаемостью и дисперсионными (рассеивающими) свойствами при продавливании через неё культуральной жидкости. Культуральная жидкость, представляющая собой раствор необходимых для питания клеток веществ (субстрат), вводится в реактор в виде ламинарных струек ($Re = 0,001–1$) че-

рез мембрану с размером пор до нескольких десятков микрометров и выводится из него через мембрану с размером пор порядка нескольких микрометров. Баланс площадей пор во входном и выходном сечении позволяет считать, что в реакторе осуществляется приблизительно однородное осевое фильтрационное течение раствора со скоростью фильтрации w , м/с.

Будем считать, что фильтрация через гель осуществляется по закону Дарси [128]:

$$w = \frac{k_0}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{H}, \quad (5.1)$$

где k_0 — проницаемость геля, м²; Δp — перепад давления на слое геля, Па; μ — динамическая вязкость фильтруемого раствора, Па·с; H — толщина слоя геля, м.

Следует заметить, что закон Дарси имеет ограничение по скоростям фильтрации как сверху, когда связь между скоростью и градиентом давления становится нелинейной, так и снизу, когда начинает сильно сказываться действие молекулярных сил [128]. Проницаемость геля k_0 является его фундаментальным свойством, которое можно оценить на основании (5.1), измеряя фильтрационный расход и перепад давления. Другой фундаментальной характеристикой геля как фильтрационной среды, описывающей его диспергирующие свойства, является эффективный коэффициент латеральной дисперсии D , м²/с. Он характеризует рассеяние элементарных струек фильтрата на неоднородностях тела геля.

В результате «букет» элементарных струек, содержащих свежий субстрат и выходящий из дискретной поры входной мембраны как из точечного источника, оказывается занимающим конечную область тела геля — факел. Если совокупность этих факелов перекрывает всю занимаемую гелем область, в которую имплантированы иммобилизованные гелем стволовые клетки, значит, клетки получают полноценное питание. Расчёт протонного реактора сводится по существу к оценке числа и размера насыщенных свежим субстратом факелов. Размеры факела должны определяться скоростью фильтрации, количеством подаваемого субстрата, эффективным коэффициентом дисперсии и скоростью потребления субстрата клетками.

Для проведения этих оценок рассматривается следующая модельная задача конвективной диффузии субстрата в среде с рассеянием и поглощением. В безграничной среде, инфильтруемой жидкостью со скоростью w , работает помещенный в начало цилиндрических ко-

ординат r, z точечный источник, выделяющий q кг/с субстрата. Субстрат сносится по оси z фильтрационным течением и диффундирует по оси r с коэффициентом латеральной дисперсии D . Кроме того, в каждой точке пространства субстрат поглощается со скоростью Kc , где K — распределённая по пространству кинетическая функция потребления (c^{-1}), а c — локальная концентрация субстрата (кг/м³). Математически задача о распределении концентрации субстрата в пространстве описывается уравнением

$$w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + q \delta(r) \delta(z) - Kc; \quad 0 \leq r < \infty, \quad -\infty < z < \infty. \quad (5.2)$$

Здесь $\delta(r), \delta(z)$ — дельта-функции Дирака соответствующих координат. Это задача без начальных и граничных условий. Её специфика заключается в дельтаобразно представленном источнике члене.

Уравнение (5.2) приводится к классическому уравнению теплопроводности с постоянным источником с помощью преобразования переменных [129]:

$$t = \frac{Dz}{w}, \quad \theta = c \exp\left(\frac{Kt}{D}\right). \quad (5.3)$$

Воспользуемся также известным свойством дельта-функции [130]:

$$\delta(z) = \delta\left(\frac{Dz}{w} \frac{w}{D}\right) = \delta\left(t \frac{w}{D}\right) = \frac{D}{w} \delta(t). \quad (5.4)$$

Уравнение (5.2) при этом принимает вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + q \delta(r) \delta(t); \quad 0 \leq r < \infty, \quad -\infty < t < \infty. \quad (5.5)$$

Уравнение (5.5) будем решать методом функции Грина, которая для данной задачи имеет вид [131]:

$$G(r, \rho, t, \tau) = \frac{1}{4\pi(t-\tau)} \exp\left[-\frac{r^2 + \rho^2}{4(t-\tau)}\right] I_0\left(\frac{r\rho}{2(t-\tau)}\right), \quad (5.6)$$

где I_0 — модифицированная функция Бесселя [130]. Тогда, согласно [7, 9], решение (5.5) есть

$$\theta(r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} G(r, \rho, t, \tau) \frac{q}{w} \delta(\rho) \delta(\tau) d\rho d\tau. \quad (5.7)$$

Принимая во внимание ещё одно свойство дельта-функции [130]

$$\int_0^{\infty} f(r-\rho)\delta(\rho)d\rho = f(r), \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau)\delta(\tau)d\tau = f(t), \quad (5.8)$$

а также то, что [130]

$$I_0(0) = 1, \quad (5.9)$$

получаем, вычисляя (5.7), решение уравнения (5.5) в виде

$$\theta(r, t) = \frac{1}{4\pi t} \exp\left(-\frac{r^2}{4t}\right) \frac{q}{w}. \quad (5.10)$$

Возвращаясь, согласно преобразованиям (5.3), обратно к переменным z и θ , находим выражение для $c(r, z)$:

$$c(r, z) = \frac{q}{4\pi Dz} \exp\left(-\frac{r^2 w}{4Dz} - \frac{K}{w} z\right). \quad (5.11)$$

Выражение (5.11) представляет собой точное решение задачи (5.2). Однако практически более интересно построить пространственные области, ограниченные изоконцентрами. Для этого, приняв $c = \text{const}$, следует разрешить выражение (11) относительно r :

$$r(z) = \sqrt[2]{\frac{Dz}{w} \left(\ln \frac{q}{4\pi Dcz} - \frac{Kz}{w} \right)}. \quad (5.12)$$

Выражение (5.12) описывает однопараметрическое (параметр c) семейство поверхностей — изоконцентрат. Элементарный анализ показывает, что это «грушевидные» замкнутые, вложенные друг в друга поверхности, пересекающие ось z в точках $z = 0$ и $z = z_0$. Точка z_0 определяется из решения трансцендентного уравнения

$$\frac{q}{4\pi Dcz_0} = \exp\left(\frac{Kz_0}{w}\right). \quad (5.13)$$

Максимальная полутолщина «грушевидной» области достигается в точке $z = z_*$, определяемой решением трансцендентного уравнения

$$\frac{q}{4\pi Dcz_*} = \exp\left(2\frac{Kz_*}{w} + 1\right) \quad (5.14)$$

и равна

$$r_* = r(z_*) = \sqrt[2]{\frac{Dz_*}{w} \left(\frac{Kz_*}{w} + 1 \right)}. \quad (5.15)$$

Будем называть «грушевидную» область, соответствующую минимально необходимому значению концентрации

$$c = c_{\min}, \quad (5.16)$$

факелом.

В частном случае малости безразмерного параметра $K = z_0/w$ при

$$\frac{Kz_0}{w} \ll 1 \quad (5.17)$$

выражения для z_0 , z_* и r_* принимают особенно простой вид:

$$z_0 = \frac{q}{4\pi D c_{\min}}, \quad z_* = \frac{z_0}{e}, \quad r_* = \sqrt{\frac{q}{\pi e w c_{\min}}}, \quad (5.18)$$

где e — основание натурального логарифма.

Формулы (5.18) в купе с визуальными наблюдениями и измерением факела позволяют оценить дисперсные свойства геля, т. е. найти параметр D , а также параметр c_{\min} :

$$D = \frac{q}{4\pi z_0 c_{\min}}, \quad c_{\min} = \frac{q}{\pi e w r_*^2}. \quad (5.19)$$

Тогда окончательно

$$D = \frac{e w r_*^2}{4 z_0}. \quad (5.20)$$

Зная проницаемость геля формула (5.1) и его дисперсионные свойства формула (5.2), можно, задавая μ и c_{\min} , выбрать геометрические и режимные параметры микробиореактора, такие как размер и плотность пор мембран во входном и выходном сечениях, расход жидкости и входная концентрация питательных веществ.

5.2. Области влияния источника примеси в фильтрационных потоках

Сыпучие среды и зернистые слои, инфильтруемые в различных гидродинамических режимах газом или жидкостью, играют важную роль во многих природных процессах, являясь основой водоносных горизонтов в гидрогеологии. Кроме того, они широко используются в различных технологических процессах, например в гетерогенном катализе, адсорбции и абсорбции, сушке и термической обработке, ядерной энергетике и микробиотехнологиях. В этих случаях ин-

фильтруемая сыпучая среда выступает как носитель, обладающий специфическими переносными свойствами и перераспределяющий в пространстве, определяемом неподвижной твердой фазой, некую субстанцию (теплоту, растворенное вещество, микрочастицы), связанную с фильтрующей подвижной фазой. Во многих случаях эту субстанцию можно считать пассивной примесью, не влияющей на механизмы конвективного и дисперсионного переноса.

Основными внутренними характеристиками слоя дисперсных сферических частиц является диаметр частицы d и его порозность (доля пустот) ϵ . Немонодисперсные засыпки могут характеризоваться средним диаметром частиц и функцией распределения частиц по размерам.

В тех широко распространенных случаях, когда микроструктурный размер дисперсной среды значительно меньше масштаба макрон неоднородностей полей концентрации примеси, уместно использовать континуальные представления, связанные с осреднением на масштабах, существенно превышающих размеры зерна, но существенно меньших масштабов макрон неоднородностей [132].

Рассмотрение задачи течения подвижной среды в пересеченном поровом пространстве засыпки с соблюдением всех соответствующих краевых условий на реальных границах контакта фаз, имеющих сложную топологическую структуру, наряду с чрезвычайной сложностью её решения дало бы избыточную информацию о полях микропараметров системы. Для практических целей достаточно знания усредненных параметров и потоков, описываемых в континуальной механике гетерогенных сред [132].

Таковыми параметрами являются скорость фильтрации W , рассчитываемая без учета перекрытия части сечения зернами засыпки, и эффективные коэффициенты теплопроводности Δ и диффузии D . Последние являются тензорными величинами, имеющими осевую и латеральную (поперечную) компоненты.

Однако в предлагаемых к рассмотрению задачах с не слишком малой скоростью фильтрации осевыми компонентами на фоне имеющего место конвективного переноса можно пренебречь и учитывать в постановке задач лишь поперечный перенос так, что Δ и D можно считать скалярами. Оба коэффициента аддитивно состоят из двух частей.

Первая связана с молекулярным механизмом переноса теплоты и концентрации, вторая, называемая конвективной дисперсией, пропорциональна величине локальной скорости фильтрации. Следует отметить, что существенный вклад может внести только эффективная молекулярная теплопроводность в результате усиления теплопроводности по частицам засыпки.

Эффективная же молекулярная диффузия ничтожно мала, так как диффузия сквозь частицы засыпки равна нулю.

Тогда

$$\Lambda = \lambda_0 + c_p \rho k d W; \quad (5.21)$$

$$D = k d W, \quad (5.22)$$

где λ_0 — эффективная молекулярная теплопроводность погруженной в подвижную фазу зернистой среды при отсутствии ее движения; c_p и ρ — теплоемкость и плотность подвижной фазы; k — эмпирический коэффициент, $k = 0,08-0,1$ [133].

При определении эффективного коэффициента диффузии для рассеивающей среды, отличной от инфильтруемого зернистого слоя, например однородного или неоднородного турбулентного потока, формулу (5.21) не используют.

Рассмотрим задачу рассеяния примеси, выделяемой стационарным точечным источником в однородно инфильтруемой зернистой среде. В континуальной постановке задача выглядит следующим образом:

$$W \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + Q \delta(r) \delta(z), \quad (5.23)$$

где c — концентрация примеси; z — осевая координата, направленная вдоль фильтрационного течения; r — радиальная координата; D — эффективный коэффициент диффузии, определяемый по формуле (5.22); Q — мощность источника примеси; $\delta(r)$ и $\delta(z)$ — дельта-функции координат r и z .

Точное решение задачи (5.23) находится методом функций Грина [131]:

$$c(z, r) = \frac{Q}{4\pi D z} \exp \left(\frac{-W r^2}{4 D z} \right). \quad (5.24)$$

Это можно проверить и прямой подстановкой (5.22) в (5.24). С учетом формулы (5.23) окончательно имеем

$$c(z, r) = \frac{Q}{4\pi kWzd} \exp \frac{-r^2}{4kzd}. \quad (5.25)$$

Полагая $c = \text{const}$ и разрешая выражение (5.25) относительно r , можно получить семейство уравнений изоконцентрат (параметр семейства c):

$$r = \left\{ 4kzd \ln \left[\frac{Q}{4\pi kWzd} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (5.26)$$

Видно, что это осесимметричные замкнутые поверхности, пересекающие ось z в точках $z = 0$ и $z = z_0 = Q/(4\pi kWcd)$.

Их максимальная полутолщина равна

$$r_m = \left[\frac{Q}{\pi e Wc} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5.27)$$

Она достигается на осевой координате

$$z_m = \frac{Q}{4\pi e k Wcd}. \quad (5.28)$$

Визуально эти поверхности представляют собой каплевидные осесимметричные фигуры с удлинённой кормовой частью. Похожая форма экспериментально наблюдалась для струи газа, вдуваемого в затопленный жидкостью зернистый слой.

Для экспериментального изучения картины формирования следа используется томографический метод. Суть метода оптической иммерсионной томографии состоит в следующем. Подбирается жидкость, имеющая показатель преломления, практически совпадающий с показателем преломления прозрачных частиц засыпки, в результате чего затопленная жидкостью засыпка становится оптически однородным прозрачным объектом, в котором можно наблюдать за движением частиц окрашенного следа в любой проекции. Это движение, зависящее от взаимодействия потока с элементами засыпки, является трехмерным и весьма сложным. Через трубу, заполненную стеклянными шариками, фильтровалась иммерсионная жидкость. В трубу по капилляру, размещенному на ее оси, равномерно подается подкрашенная жидкость. На одном осевом расстоянии помещается источник

света, световой фильтр и фотоприемник с щелевым устройством размером 10×2 мм. С помощью фотоприемника измеряется осредненный по площади щели выходной сигнал, который по тарировочной кривой позволяет определить концентрацию, характерную для конкретного осевого расстояния.

Концентрация измерялась в условных единицах согласно данным тарировки.

- На основании точного решения уравнения конвективной диффузии примеси в осесимметричном случае построена математическая модель формы следа от точечного источника в однородно инфильтруемой зернистой среде.

- Определено, что области, ограниченные изоконцентрациями, являются ограниченными областями пространства, зависящими от параметров задачи (скорости фильтрации, расхода примеси, размера элементов засыпки).

- С применением методики визуализации факела примеси в фильтрационном потоке экспериментально обнаружена замкнутость областей распространения примеси определенной концентрации;

- Разработана оригинальная экспериментальная методика оценки концентрации в осевых точках следа, т. е. методика оценки дальнобойности струи; сопоставление полученных экспериментальных оценок с теоретическими показывает адекватность теоретической модели.

- Получены приложения в области экологии подземных вод и оценки минимальных размеров (длины и диаметра) проточных аппаратов химической технологии с неподвижным слоем катализатора.

Задавая для экологических приложений предельно допустимую концентрацию (ПДК) вредной примеси $c_{\text{пдк}}$, а также мощность источника примеси Q , скорость фильтрации W и микроструктурные размеры частиц грунта d , можно по формулам (5.27) и (5.28) оценить размеры области (полутолщину r_{m3} , длину z_m), в которой грунтовые воды имеют опасную концентрацию вредной примеси. В случае химико-технологических приложений задание концентрации реагента минимально необходимой для проведения реакции (c_{min}) наряду с заданием Q , W , d можно по формулам, аналогичным (5.27) и (5.28), оценить размеры области проведения реакции, сопоставив их с размерами (радиусом и длиной) трубчатого реактора.

5.3. Межфазный массообмен в зернистой засыпке и геле

Проведено экспериментальное и численное исследование процесса межфазного массообмена при движении газового пузыря в насыщенной жидкостью зернистом слое при различных углах наклона трубки и в случае движения в канале между слоями геля. Получены зависимости эффективного безразмерного коэффициента массоотдачи в зависимости от угла наклона трубки и диаметра засыпки. Установлена связь между эффективным безразмерным коэффициентом массоотдачи и скоростью свободно всплывающего газового пузыря.

Снарядный режим движения в трёхфазных системах представляет особый интерес в связи с тем, что задача движения крупных газовых пузырей в трубах находит широкое применение в промышленности, например в системах тепломассообмена и фильтрации [134]. Трёхфазные потоки (газ — жидкость — твердые частицы), в особенности системы, в которых роль твёрдой фазы играет зернистая засыпка, широко используются в энергетике, химических и биотехнологиях. Движение газожидкостного потока при наличии зернистой засыпки заметно увеличивает многообразие режимов их течения и может качественно менять картину устойчивости таких потоков вследствие иного гидродинамического поведения межфазной границы, а также оказывать влияние на интенсификацию процессов переноса.

Механизм процессов переноса на межфазных границах таких систем достаточно сложен и, несмотря на наличие работ, посвящённых данному исследованию [1, 2], решение этой проблемы далеко от завершения. Зернистая засыпка образует сложную конфигурацию микроканалов, в которых существенным фактором становится влияние капиллярных сил, что не позволяет предложить единую модель процессов массопереноса в зернистых засыпках. В связи с этим появляется необходимость в дополнительных теоретических и экспериментальных исследованиях.

Гораздо лучше изучены газожидкостные системы [3, 4]. Они находят применение не только в нефтегазовой промышленности, но и в биотехнологических процессах. При изучении аддитивных процессов нанесения гелей применительно к задачам биопринтинга авторами был обнаружен эффект возникновения плоских микроканалов между слоями геля, заполненных газом и жидкостью. В случае наличия микроорганизмов внутри геля возможно выделение углекислого газа в полости и каналы внутри геля. Для полноценного функционирования

микроорганизмов в геле необходим своевременный отвод продуктов жизнедеятельности. При этом на скорость отвода оказывает влияние интенсивность абсорбции и скорость всплытия пузырьков газа, что приводит к необходимости проведения экспериментальных и теоретических исследований процесса массопереноса газовых пузырей в геле. Несмотря на то что задача движения пузырей в микроканалах рассматривалась ранее [152], динамика двухфазных потоков в гелях малоизучена. Актуальность подобных исследований также обусловлена активным развитием технологий трёхмерной печати живых тканей [138] и органов [139].

Целью данной работы является получение новых экспериментальных и расчётных данных по интенсивности межфазного массообмена газовых пузырей в зависимости от угла наклона при движении многофазного потока в трубке с зернистой засыпкой и геле.

Решение задач гидрогазодинамики сопряжено с многопараметрическими задачами, для которых редко удается получить решение в строгой аналитической форме [140]. Чаще всего решение ограничивается рассмотрением их простейших модельных аналогов. Численные методы обладают более широкими возможностями, чем аналитические, однако большинство существующих методик позволяют рассчитывать лишь некоторые задачи динамики газожидкостных потоков, которые в общем случае не эквивалентны исходной физической постановке [141].

Применение современных численных методик, таких как метод сглаженных частиц, позволяет упростить математическое описание задачи, что делает возможным численное моделирование трёхфазных систем при наличии твёрдой фазы различной геометрии. Метод сглаженных частиц был использован при моделировании многокомпонентных смесей [142], процессов истечения газожидкостных потоков [143] и процессов тепломассообмена [144]. Метод сглаженных частиц также применяется при решении задач гидрогазодинамики при движении в каналах сложной формы [145], включая движение в пористых и гелеобразных структурах [146].

Используя экспериментальную установку, подробно описанную в работе [151], провели экспериментальные исследования процесса межфазного массообмена свободно всплывающих газовых пузырей в вертикальной и наклонной трубах для системы «газ — жидкость — твёрдые частицы». На рисунке 5.1 показана фотография подобной системы при наличии иммерсионной жидкости.

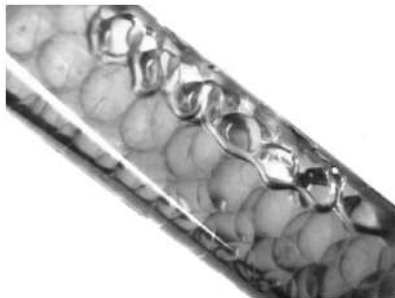


Рис. 5.1

*Газовый пузырь в трубке с зернистой засыпкой
и иммерсионной жидкостью*

Эксперименты проводились на трубке с внутренним диаметром 12 мм и рабочим участком длиной 400 мм. В качестве твёрдой фазы использовались стеклянные шарики диаметром 5 и 10 мм. Диаметры засыпки были выбраны с целью создания модельной среды, в которой газовый пузырь сохраняет целостность при своём движении. Трубка устанавливалась на заданный угол. Установка позволяла варьировать угол наклона от 10 до 90° с шагом 10°. Перед опытом трубка заполнялась зернистой засыпкой, после чего заливался этанол. В качестве газообразной фазы использовался углекислый газ, поступающий из генератора, который вводился в трубку с помощью шприца. Для улучшения качества видеозаписи эксперимента в стенд встроена светодиодная подсветка. После включения подсветки и видеозаписи углекислый газ определённого объёма подавался в нижнюю точку трубки с помощью мерного шприца. С целью изолирования системы от попадания воздуха верхняя часть трубки имела специальный клапан для отвода излишков жидкости.

Опорная длина выбиралась с учетом участка стабилизации движения пузыря в канале и составила 250 мм. Объем пузыря составлял 8 см³. Для измерения массоотдачи при абсорбции углекислого газа в этаноле фиксировались начальное и конечное значения объемов пузыря. По полученным данным, используя времяпролётный метод, строились зависимости скорости всплытия пузыря от угла наклона и рассчитывался эффективный безразмерный коэффициент массоотдачи.

В исследовании рассмотрена задача движения газового пузыря в трубке в присутствии зернистой среды как элементов модели зернистой среды. Модель движения газового пузыря в трубке с учётом

процесса массоотдачи разработана на основе метода сглаженных частиц. Метод основан на представлении жидкости как совокупности частиц, которые располагаются на некотором расстоянии друг от друга, называемом расстоянием сглаживания [147]. Влияние каждой частицы на свойства соседних частиц рассчитывается на основе её плотности и расстоянии до частицы, для которой нужно рассчитать параметры. Для расчёта вводится понятие функции ядра. В качестве функции ядра, как правило, используется функция Гаусса [148]. Значение произвольной величины в точке r в интегральном виде задается следующей формулой

$$A(r) = \int A(r)W(r-r', h)dr'. \quad (5.29)$$

В дискретном представлении значение для произвольной точки представляется в следующей форме:

$$A(r) = \sum_i m_i \frac{A_i}{\rho_i} W(|r-r'|, h). \quad (5.30)$$

Для метода сглаженных частиц уравнение Навье — Стокса в дискретной форме примет вид

$$\rho_i a_i = p_i + v_i + \rho_i g. \quad (5.31)$$

Для вычисления давления (5.32) и вязкости (5.33) применим (5.30):

$$p_i = - \sum_j m_j \frac{p_j - p_i}{\rho_j} W(|r_i - r_j|, h); \quad (5.32)$$

$$v_i = \mu \sum_j m_j \frac{v_j - v_i}{\rho_j} \nabla W(|r_i - r_j|, h). \quad (5.33)$$

Для учета процесса массоотдачи аппроксимируем уравнение диффузии (5.34) аналогичным образом (5.35):

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2}; \quad (5.34)$$

$$c_i = D \sum_j m_j \frac{c_j - c_i}{\rho_j} \nabla^2 W(|r_i - r_j|, h). \quad (5.35)$$

Выражения (5.31), (5.32), (5.33), (5.35) образуют систему уравнений, описывающих данную модель.

Расчётная область в случае расчёта движения и массоотдачи газового пузыря в трубке с зернистым слоем представляет собой цилиндр, имеющий свободное пространство в начале для стабилизации скорости газового пузыря и в конце для приёма пузыря после прохо-

ждения через зернистый слой (рис. 5.2). Расчёты проводились для углов от 10 до 90° с шагом 5°.

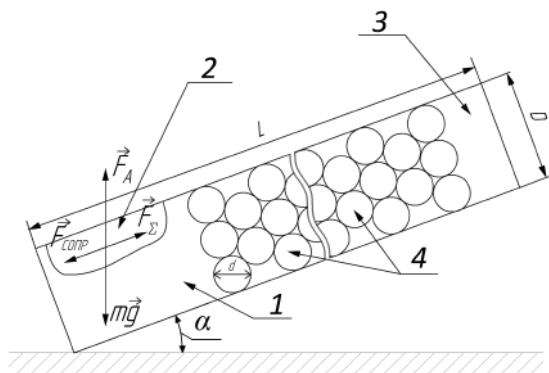


Рис. 5.2

Схема расчётной области трубки с зернистой засыпкой:

1 — входной участок; 2 — газовый пузырь; 3 — конечный участок;
4 — зернистая засыпка.

В случае движения газового пузыря углекислого газа в канале между слоями геля, заполненного этанолом, расчётная область представляет собой прямоугольный параллелепипед с прямым каналом прямоугольного сечения. Длина канала составляет 40 мм, ширина 8 мм, а толщина 1 мм (рис. 5.3).

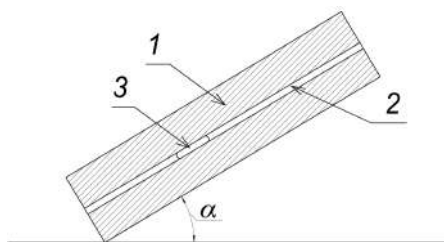


Рис. 5.3

Схема расчётной области канала в геле:

1 — гель; 2 — канал, заполненный жидкостью; 3 — газовый пузырь.

На газовый пузырь оказывает воздействие подъёмная сила, которая компенсируется силой тяжести. Также на скорость всплытия оказывает влияние гидравлическое сопротивление среды, которое обусловлено кривизной головки пузыря. Газовый пузырь задаётся как

совокупность частиц, формирующих область в форме прямоугольного параллелепипеда, имеющую плотность углекислого газа. В течение нескольких десятков итераций после начала процесса моделирования исходная область с углекислым газом преобразуется в форму газового пузыря (рис. 5.4), наблюдаемого в эксперименте (рис. 5.1).

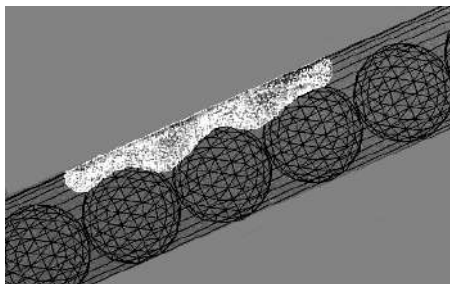


Рис. 5.4

Визуализация процесса моделирования газового пузыря в трубке с зернистой засыпкой

При математическом моделировании газовых пузырей в случае, если исходная форма пузыря задаётся изначально, возникает вопрос обоснованности выбора определённой формы. Вышеописанный подход позволяет отказаться от задания начальной формы пузыря и упростить постановку задачи.

Твёрдая фаза в форме сферической засыпки формируется с помощью подпрограммы, которая проводит укладку шаров в трубке. Работа подпрограммы заключается в том, чтобы обозначить определённые частицы внутри расчётной области как принадлежащие к твёрдой фазе. В результате получившаяся совокупность частиц твёрдой фазы формирует геометрию, соответствующую шаровой засыпке. В качестве входных данных подпрограмма принимает диаметр зерна засыпки и тип укладки.

Наличие сферической засыпки вызывает необходимость учёта взаимодействия жидкой и газообразной фаз с твёрдыми телами. Твёрдая фаза рассматривается как недеформируемая совокупность сглаженных частиц, взаимодействующая с жидкой и газообразной фазами с определённой силой. Для каждой сглаженной частицы, принадлежащей к жидкой либо газообразной фазе, задаётся сила f , действующая на частицу, принадлежащую к твёрдой фазе, противоположно вектору движения частицы. В работе [149] для моделирования взаимодействия газожидкостного потока с твёрдой границей было предложено использовать потенциал, аналогичный потенциалу Лен-

нард-Джонса, используемый при моделировании взаимодействия сферических молекул, однако подобный подход приводил к возмущениям потока при движении параллельно твёрдому телу. Подход, предложенный в [150], позволяет моделировать взаимодействие газожидкостного потока с препятствиями без искажений. При взаимодействии сглаженных частиц, принадлежащих к газообразной и жидкой фазам, вводится сила, действующая по нормали со стороны сглаженной частицы a газожидкостного потока на частицу k , принадлежащую твёрдой граничной области:

$$f_{ka} = -\frac{m_a}{m_a + m_k} B(x, y) n_k. \quad (5.36)$$

Совокупная сила воздействия частиц газа и жидкости на частицу твёрдой фазы рассчитывается следующим образом:

$$f_k = \sum_a f_{ka}. \quad (5.37)$$

Чтобы компенсировать силу, действующую со стороны газа и жидкости на твёрдые частицы, вводится сила, действующая со стороны твёрдой частицы:

$$f_{ak} = -\frac{m_k}{m_a + m_k} B(x, y) n_k. \quad (5.38)$$

Для исключения возможности возмущений при движении потока параллельно границе вводится ступенчатая функция $B(x, y)$, которая резко возрастает при сокращении расстояния между частицами, тем самым препятствуя прохождению частиц газожидкостного потока внутрь границы.

Для верификации разработанной модели был проведён расчёт тестовой задачи по моделированию свободно всплывающего газового пузыря в чистой жидкости без частиц при различных углах наклона трубки с целью сравнения с ранее полученными экспериментальными данными [151]. Результаты расчёта показали, что зависимость скоростей всплытия газового пузыря от угла наклона трубки демонстрирует экстремальный характер, а максимум скорости всплытия приходится на угол 40° , что согласуется с результатами экспериментальных исследований.

В случае движения газового пузыря углекислого газа в этаноле при наличии зернистой засыпки также наблюдается экстремальный характер скоростей, однако максимум скорости наблюдается в области $50\text{--}60^\circ$. При этом скорость всплытия при наличии частиц диаметром 5 мм меньше, чем в случае 10 мм (рис. 5.5).

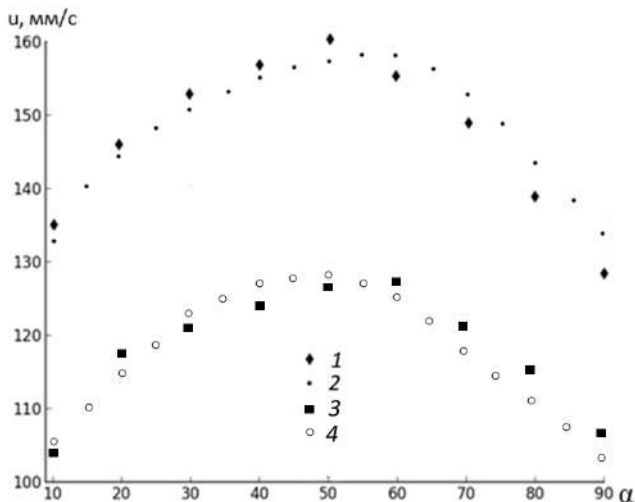


Рис. 5.5

Скорость всплытия газового пузыря CO_2 в этаноле в зависимости от угла наклона трубки при наличии зернистой засыпки:

1 — экспериментальные данные, диаметр засыпки 10 мм; 2 — расчетные данные, диаметр засыпки 10 мм; 3 — экспериментальные данные, диаметр засыпки 5 мм; 4 — расчетные данные, диаметр засыпки 5 мм.

На качественном уровне подобный экстремальный характер поведения скоростей может быть объяснен следующим образом. При малых углах наклона проекция подъёмной силы на вертикальную ось мала, чем объясняется низкая скорость всплытия. В области углов $40\text{--}50^\circ$ в случае чистой жидкости влияние подъёмной силы возрастает, а форма профиля пузыря обеспечивает снижение гидравлического сопротивления. Совокупность данных факторов обеспечивает максимальную скорость всплытия при данных углах наклона трубки. При дальнейшем увеличении угла наклона подъёмная сила увеличивается, однако профиль газового пузыря создает существенное сопротивление, что приводит к снижению скорости всплытия [151]. Зернистая засыпка создаёт в трубке сеть каналов сложной геометрии, малый размер которых приводит к возникновению капиллярных эффектов и искажению профиля пузыря, что может быть причиной смещения максимумов скоростей в сторону больших углов.

Для определения интенсификации массоотдачи газового пузыря при различных углах наклона был введён безразмерный эффективный

коэффициент массоотдачи, вычисляемый как отношение объёма газового пузыря в конце рабочего участка при заданном угле наклона к объёму газового пузыря в конце рабочего участка при вертикальном положении трубки:

$$\delta = \frac{V_a}{V_{90}}. \quad (5.39)$$

Таким образом, можно оценить влияние наклона угла трубки на интенсивность процесса массоотдачи. Был проведён расчёт эффективного безразмерного коэффициента массоотдачи для случая засыпки диаметром 5 мм (рис. 5.6) и в случае диаметра зерна 10 мм (рис. 5.7) и получены соответствующие зависимости от угла наклона. В случае зернистой засыпки ввиду отрыва пузыря от стенки при вертикальном случае в числителе безразмерного коэффициента массоотдачи учитывается объём при квазивертикальном положении трубки, равный приблизительно 85° .

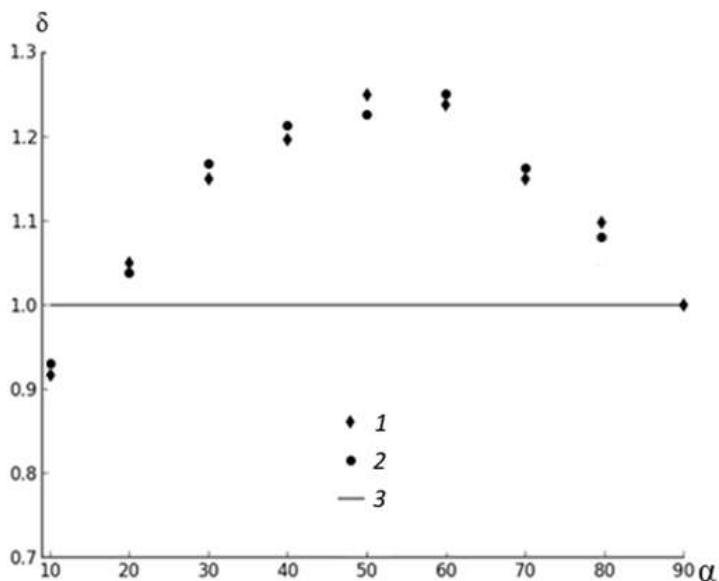


Рис. 5.6

Эффективный безразмерный коэффициент массоотдачи в зависимости от угла наклона трубки при наличии зернистой засыпки диаметром 5 мм:
1 — эксперимент; 2 — модель; 3 — вертикальная трубка.

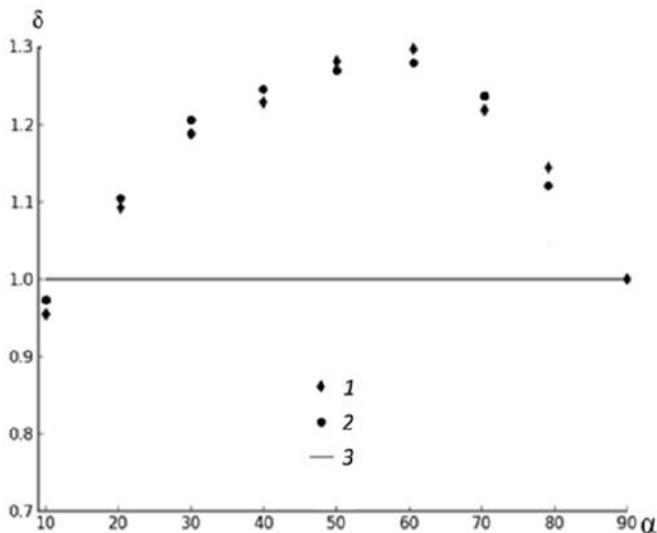


Рис. 5.7

Эффективный безразмерный коэффициент массоотдачи в зависимости от угла наклона трубки при наличии зернистой засыпки диаметром 10 мм:

1 — эксперимент; 2 — модель; 3 — вертикальная трубка.

Вклад в процесс массоотдачи вносят гидродинамика пузыря и поверхность раздела фаз. При этом максимальное значение эффективного коэффициента массоотдачи соответствует углу наклона, при котором скорость всплытия пузыря максимальна. При увеличении скорости всплытия газовый пузырь проходит рабочий участок за меньшее время, соответственно время взаимодействия между фазами уменьшается. Полученная зависимость позволяет сделать вывод о том, что время межфазного контакта является определяющей характеристикой интенсивности процесса массоотдачи.

Полученные данные по численному моделированию движения газового пузыря в канале между слоями геля показали, что процесс всплытия газового пузыря в геле также носит экстремальный характер, однако экстремум не так выражен по сравнению с движением пузыря в трубке. По результатам численного расчёта при углах наклона менее 10° движение пузыря, имеющего в плоском канале форму дис-

ка, не происходит. При увеличении угла наклона с 20 до 50° наблюдается резкий рост скорости, после чего скорость уменьшается незначительно по линейному закону (рис. 5.8).

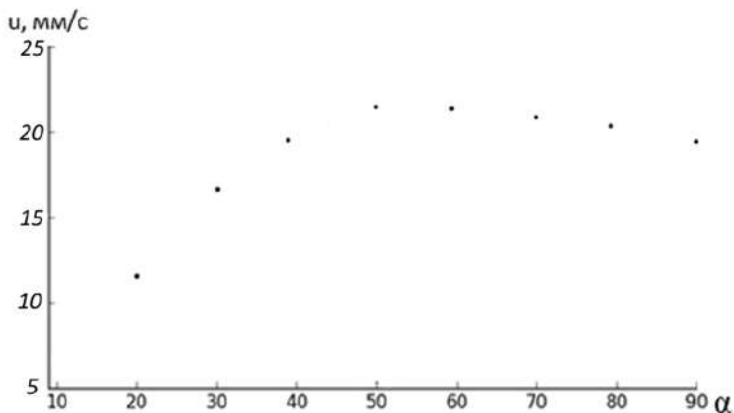


Рис. 5.8

*Скорость всплытия газового пузыря CO_2 в этаноле
в зависимости от угла наклона канала в геле,
расчётные данные*

Характер зависимости может быть объяснён изменением формы пузыря при увеличении подъёмной силы. При углах наклона в диапазоне $20\text{--}50^\circ$ увеличение подъёмной силы приводит к росту скорости всплытия. При дальнейшем увеличении угла наклона наблюдается расширение пузыря по оси, перпендикулярной направлению движения, что вызывает увеличение гидравлического сопротивления и снижение скорости всплытия.

Расчёт эффективного безразмерного коэффициента массоотдачи показал, что, аналогично случаю с трубкой, безразмерный коэффициент массоотдачи имеет прямую зависимость от скорости всплытия пузыря (рис. 5.9).

Общий характер зависимостей скоростей всплытия пузырей в трубке и в канале внутри геля может быть вызван изменением формы головки пузыря в области критической точки [151].

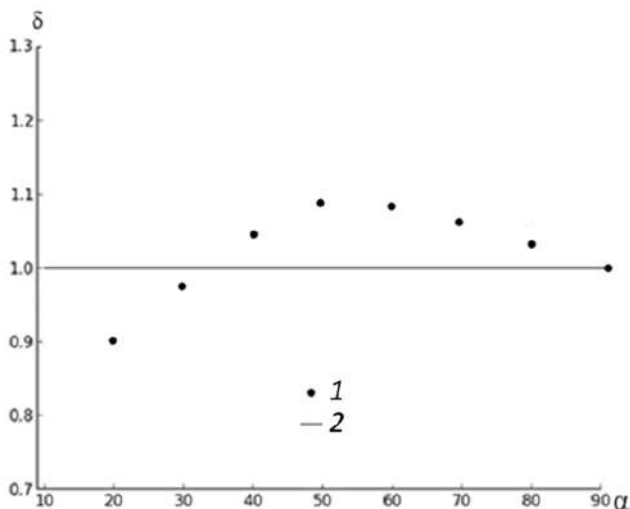


Рис. 5.9

Эффективный безразмерный коэффициент массоотдачи в зависимости от угла наклона канала в геле, расчётные данные:

1 — модель; 2 — вертикальная трубка.

Показано, что в случае процесса массоотдачи в зернистой засыпке скорость пузыря в зависимости от угла наклона трубки имеет немо­нотонный экстремальный характер, а максимум скорости приходится на угол 60° . В случае движения пузыря в плоском канале внутри геля скорость всплытия монотонно возрастает до 50° . Дальнейшее увеличение угла наклона приводит к незначительному монотонному снижению скорости. Использование метода сглаженных частиц применительно к моделированию движения газового пузыря показало эффективность данного метода при решении подобных задач. Метод сглаженных частиц позволил упростить математическое описание задачи и повысить скорость проведения численного расчёта. С целью оценки интенсификации межфазного массообмена был введён безразмерный коэффициент массоотдачи, расчёт которого показал, что интенсивность межфазного массообмена имеет прямую зависимость от средней скорости всплытия пузыря. В общем случае процесс массоотдачи определяется гидродинамикой пузыря и поверхностью раздела фаз. Разработанная модель позволяет проводить моделирование динамики многофазных потоков в каналах сложной геометрии, формируемой

сферической засыпкой, а также позволяет решать задачи массообмена в таких средах и гелях.

5.4. Исследование процесса формирования и старения геля

Выполнено экспериментальное и численное исследование процесса испарения жидкости из геля в процессе его формирования и полимеризации. В экспериментальном исследовании использовался агарозный гель различных концентраций. Определён интервал установления стационарной температуры при формировании геля и произведено математическое моделирование процесса испарения на данном интервале. Результаты моделирования были сопоставлены с результатами эксперимента. Получены зависимости изменения массы геля от времени и определены характерные режимы формирования геля.

Развитие аддитивных технологий, в том числе биопечати, в таких областях, как медицина и биотехнологии, требуют понимания динамики процессов формирования и старения гелей с целью разработки оптимальных технологических процессов нанесения гелей с помощью технологий биопринтинга [139]. Формирование гелей связано со сложными гидродинамическими и теплофизическими процессами, происходящими во внутренней микроструктуре геля. При этом процессы массопереноса в геле сопряжены с взаимодействием нескольких фаз на малых линейных масштабах [153]. С целью определения динамики процесса испарения жидкости при формировании геля проведено экспериментальное и численное исследование с целью измерения скорости испарения жидкой фазы в процессе остывания образца геля.

Экспериментальная установка представлена на рисунке 5.10.

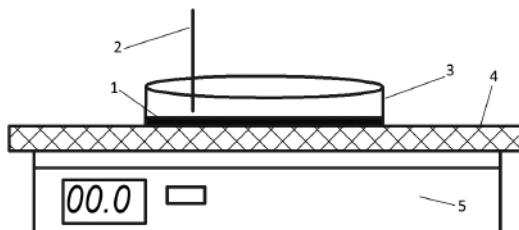


Рис. 5.10

Экспериментальная установка:

1 — слой агарозного геля; 2 — термопара; 3 — чашка Петри; 4 — теплоизолирующая пластина, 5 — электронные весы.

Установка включает в себя электронные весы 5, на которые устанавливалась чашка Петри 3 с нанесённым слоем геля 1. В гель помещалась термопара 2 для измерения температуры. При этом поверхность чашки Петри была изолирована от площадки весов с помощью теплоизолирующей пластины из пенопласта 4 с целью исключения тепловых потерь при контакте ёмкости с площадкой весов.

В экспериментальном исследовании использовался агарозный гель концентрацией 0,6 и 1%. В начале эксперимента приготовленный образец геля при температуре 60°C наносился на поверхность чашки Петри. Затем чашка устанавливалась на теплоизолирующую пластину, установленную на площадке весов. Далее в гель вводилась термопара. Перед началом эксперимента включался таймер для отсчёта времени. Изменения показаний термопары и электронных весов фиксировались в таблице с соответствующим значением времени по таймеру.

Расчётная модель процесса испарения основана на представлении геля как системы капилляров. При этом движение жидкости внутри геля, включающее действие капиллярных сил, обеспечивающих подвод жидкости из внутренних слоёв геля к поверхности в процессе испарения, сопряжено с движением жидкой фазы в микроканалах сложной конфигурации [154].

В данной задаче при математическом моделировании рассматривался случай испарения жидкости при подводе жидкой фазы по системе капилляров к поверхности геля. Производился расчёт парового потока, направленного по нормали к поверхности геля, проходящего через эффективную площадь поверхности капилляров при стационарной температуре:

$$F = -D \int \operatorname{div}(n) \cdot ds, \quad (5.40)$$

где F — паровой поток; D — коэффициент диффузии; n — нормаль, ds — элементарная единица поверхности.

Плотность капилляров на единицу поверхности определялась с помощью качественного анализа фотографий микроструктуры геля, полученных методом электронной микроскопии в [155].

Фиксация изменений массы и температуры производилась в течение 2 часов 40 минут. Данный временной интервал позволяет зафиксировать характерные стадии формирования и старения геля, включая начальную стадию формирования структуры и его полиме-

ризацию. На основе полученных данных была построена зависимость изменения массы геля от времени (рис. 5.11).

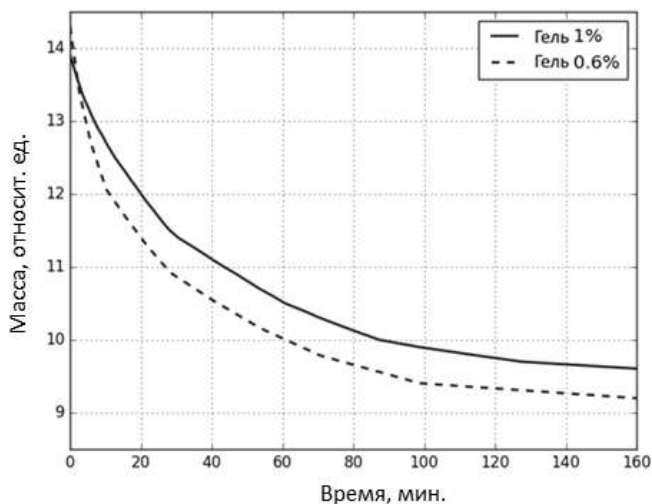


Рис. 5.11

Динамика испарения геля во времени при различных концентрациях

В первые 20 минут эксперимента наблюдается линейная зависимость изменения массы геля во времени. Характер зависимости может быть связан с тем, что в данный период идёт формирование геля и испарение жидкости производится с поверхности геля, при этом возможен подвод жидкости из глубинных слоёв геля за счёт действия капиллярных сил. В интервале от 20 минут до 2 часов характер зависимости становится нелинейным, что может быть обусловлено действием дополнительных факторов на процесс испарения, таких как процесс усадки геля. После 2 часов наблюдается стабилизация процесса испарения. Причина стабилизации может быть связана с тем, что оставшейся жидкости недостаточно для действия капиллярных сил для подвода жидкости к поверхности геля, что приводит к тому, что процесс испарения продолжается внутри пор, где суммарная поверхность испарения меньше в сравнении с поверхностью геля.

Измерение температуры во времени позволило выделить режим установления стационарной температуры, к которому применима используемая расчётная модель (рис. 5.12).

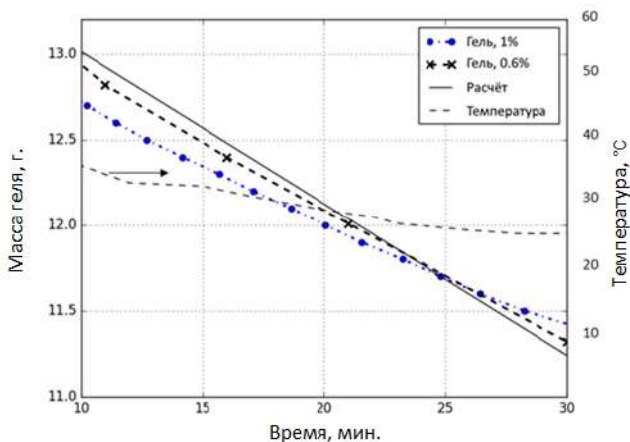


Рис. 5.12

Динамика испарения геля на этапе стабилизации температуры

Для данного режима был произведён численный расчёт динамики испарения жидкости и произведён сравнительный анализ с экспериментальными результатами для агарозного геля с концентрациями 0,6 и 1%.

Зависимости изменения массы геля носят линейный характер на данном участке. Динамика испарения для заданных концентраций не имеет существенных отличий. Схожесть характера испарения жидкости для данных концентраций может быть связана с тем, что разница в концентрации недостаточна для проявления изменений во внутренней структуре геля.

Определено три характерных этапа испарения геля: линейный, соответствующий процессу формирования геля, нелинейный, связанный с действием капиллярных сил и усадки геля, и этап полимеризации. Выполнено сопоставление результатов расчёта с экспериментом и показана эффективность модели для этапа формирования геля. Характер зависимостей испарения геля от времени на этапе формирования образца демонстрирует линейный характер, при этом динамика испарения агарозного геля с концентрацией 0,6% отличается от концентрации 1% геля незначительно, что позволяет сделать вывод о схожести внутренней структуры геля при данных концентрациях.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке
Российского научного фонда (проект № 15-19-00177)**

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ванькова, А. А.* Микробиология : учебник / О. Д. Сидоренко, Е. Г. Борисенко, А. А. Ванькова [и др.]. — М. : Инфра-М, 2005.
2. *Гармаш, С. Н.* Биоконверсия органических отходов. — Днепропетровск : Изд-во УГХТУ, 2008. — 31 с.
3. *Hinnebusch, A. G.* Translational regulation of GCN4 and the general amino acid control of yeast // *Annu. Rev. Microbiol.* — 2005. — Т. 59. — С. 407–450.
4. *Сидоренко, О. Д.* Биологические технологии утилизации отходов животноводства : учеб. пособие / О. Д. Сидоренко, Е. В. Черданцев. — М. : Изд-во МСХА, 2001. — 74 с.
5. *Гармаш, С. Н.* Перспективы использования модульного биотехнологического оборудования // *Вопросы химии и химической технологии.* — 2012. — № 6. — С. 34–37.
6. Пат. 2013128539/13 РФ. Способ получения кормового продукта и концентрата / А. Н. Лазаревич, А. П. Леснов, Н. А. Табаков. — № 2532452 : опубл. 21.06.2013. Бюл. № 31.
7. Пат. US8003833 B2, US 10/717,076 Reducing odorous emission; high energy efficiency; multistage process; slurring, heating, pressurization, separation / Brian S. Appel, Terry N. Adams, Michael J. Roberts, William F. Lange, James H. Freiss, Craig Timothy Einfeldt, Michael Charles Carnesi. — Filed 18.11.2003. Patented 23.08.2011.
8. *Эрнст, Л.* Переработка отходов животноводства и птицеводства / Л. Эрнст, Ф. Злочевский, Г. Ерастов // *Животноводство России.* — 2004. — Май. — С. 23–27.
9. *Кадыров, Д.* Экструзионная переработка биологических отходов в корма / Д. Кадыров, А. Гарзанов, В. Плитман // *Птицеводство.* — 2008. — № 7. — С. 51–54.
10. Экструзионная переработка пищевых отходов убоя и переработки животных, птицы, рыбы // Информационный материал ООО «ГК Агро-3. Экология». — 2010. — 3 с.
11. *Титов, И. Н.* Вермокультура как возобновляемый источник животного белка из органических отходов / И. Н. Титов, В. М. Усов // *Вестник Томского государственного университета. Биология.* — 2012. — № 2 (18). — С. 74–80.
12. Пат. 2004101334/12 РФ. Способ получения биогумуса / С. С. Конин, И. Н. Титов, В. В. Лавров. — № 2255078.2005 ; опубл. 16.01.2004. Бюл. № 18.

13. *Алехин, Ю. Н.* Особенности получения и питательность экструдированных кормов с включением боенских отходов / Ю. Н. Алехин [и др.] // Кормопроизводство. — 2014. — № 4. — С. 44–48.

14. *Титов, И. Н.* Новые фармацевтические препараты из дождевых червей / И. Н. Титов, С. С. Конин // Дождевые черви и плодородие почв : материалы II Междунар. конф., 17–19 марта 2004 г., Владимир. — Владимир, 2004.

15. *Повхан, М. Ф.* Вермикультура: производство и использование / М. Ф. Повхан, И. А. Мельник, В. А. Андриенко [и др.]. — Киев : УкрИНТЭИ, 2004. — 128 с.

16. *Титов, И. Н.* Новые фармацевтические препараты из дождевых червей / И. Н. Титов, С. С. Конин // Дождевые черви и плодородие почв : материалы II Междунар. конф., 17–19 марта 2004 г., Владимир. — Владимир, 2004.

17. Вермикомпостирование и вермикультивирование как основа экологического земледелия в XXI веке: достижения, проблемы, перспективы : сб. науч. трудов. — Минск : НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам, 2013. — 250 с.

18. Пат. 2074600 РФ, МПК А01С3/02. Биогазовая установка анаэробного сбраживания органических отходов / Сафин Р. Г., Голубев Л. Г., Лашков В. А., Наумова А. Л., Пантелеева Л. Б., Зубков А. В., Липачев В. М. ; патентообладатель Научно-технический центр по разработке прогрессивного оборудования. — Заявл. 26.01.1993 ; опубл. 10.03.1997.

19. Пат. 2042302 РФ, МПК А01С3/02. Микробиологических реактор для переработки органических отходов / Б. И. Пименов, И. Б. Пивикова ; патентообладатель И. Б. Пивикова. — Заяв. 28.01.1993 ; опубл. 27.08.1995.

20. Пат. № 2098481 РФ, МПК С12М1/00. Устройства для работы с ферментами или микроорганизмами / В. И. Тумченко ; патентообладатель В. И. Тумченко. — Заяв. 28.02.1995 ; опубл. 10.12.1997.

21. Пат. US 6,439,487 В1 МПК: В02С 23/36, 241/46.013; 241/46.017, 241/46.013, 46.014, 241/46015, 46.016, 46.017, 46.06, 46.08; авторы : Scott W. Anderson ; David W. Barke, both of Racine ; Paul W. Boske, Caledonia; Timothy W. Kolloch, Kenosha, all of WI (US) ; патентообладатель Emerson Electric Co., St. Louis, MO (US). — Заявл. Mar. 14, 2000 ; опубл Aug. 27, 2002.

22. *Бабков-Эстеркин, В. И.* Пищевые отходы — экологические проблемы и направления их решения // Человек в большом городе

- 21 в. : Междунар. конгр. по пробл. окруж. среды и урбаниз. ЕВРО'98, М., 1–4 июня, 2008. — М., 2008.
23. Об утверждении Правил пользования системами коммунального водоснабжения и канализации в Российской Федерации : Постановление Правительства РФ от 12 февраля 1999 г. № 167 (с изм. и доп. от 08.08.2003, 13.02.2006, 23.05.2006, 25.06.2012, 29.07.2013, 05.01.2015).
24. Об отходах производства и потребления : Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ (ред. от 29.12.2014) (с изм. и доп. от 29.12.2015).
25. *Венцюлис, Л. С.* Теория и практика обращения с отходами в современном мире / Л. С. Венцюлис, Ю. И. Скорик // Экотехнологические аспекты переработки отходов большого города. — СПб., 2001. — С. 15–31.
26. Об отходах производства и потребления : Закон Нижегородской области № 226-З от 23 ноября 2001 г. (с изм. № 148-З от 05.11.2014).
27. *Юлбарисова, Ф. А.* Оценка условий труда работников при сборе твердых бытовых отходов / Ф. А. Юлбарисова, М. А. Бабаджанов, И. А. Матмуратов // Молодой ученый. — 2015. — № 2. — С. 76–80.
28. *Трофименко, Ю. В.* Модель управления транспортирования ТБО / Ю. В. Трофименко, С. Н. Просов, В. И. Комков // Эко-geal. — 2007. — № 2.
29. СанПиН 42-128-4690-88. Санитарные правила содержания территорий населенных мест. — М. : Минздрав СССР, 1988.
30. Правила проведения дезинфекции и дезинвазии объектов государственного ветеринарного надзора № 13-5-2/0525 : утв. Минвом сельского хоз-ва РФ 15.07.2002.
31. СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях (с изм. и доп. от 27.12.2010).
32. О введении в действие санитарных правил : Постановление главного государственного санитарного врача РФ от 8 ноября 2001 г. № 31 (с изм. и доп. от 01.04.2003, 03.05.2007, 29.12.2010, 31.03.2011).
33. A brief summary and interpretation of key points, facts, and conclusions for University of Wisconsin Study: "Life cycle comparison of five engineered systems for managing food waste" by William F. Strutz IN-SINK-ERATOR, 1998.

34. California Department of Resources, Recycling, and Recovery. Statewide Anaerobic Digester Facilities for the Treatment of Municipal Organic Solid Waste. February 2011 [Электрон. данные]. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.calrecycle.ca.gov/swfacilities/Compostables/AnaerobicDig/DPEIR.pdf>

35. Отчет по оценке глобального рынка управления отходами [Электрон. данные]. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.researchandmarkets.com/product/1a0b84/global_waste_management_market_assessment

36. New York City Economic Development Corporation and New York City Department of Sanitation. Evaluation of New and Emerging Solid Waste Management Technologies. September 2004 [Электрон. данные]. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nyc.gov/html/dsny/downloads/pdf/swmp_implement/otherinit/wmtech/phase1.pdf

37. List of Treatment, Storage And Disposal Facilities in the United States The National Biennial RCRA Hazardous Waste Report (Based on 1997 Data), Solid Waste and Emergency Response (5305W) EPA530-R-99-036b PB99-166 837.

38. Пат. US 4,721,585 А МПК: C02F3/10, C02F3/28, C02F3/12, C02F3/08, C02F3/34 / Ulderico Melchiorri Santolini, Roberto Antonietti, Pierluigi Viaroli, Caterina Della Sala Merigo, Gianpaola Malara, Mario Contesini (US) ; патентообладатель Consiglio Nazionale Delle Ricerche, Universita Degli Studi Di Parma (Us). — Заявл. 24.01.1986 ; опубл. 26.01.1988.

39. Яковлев, С. В. Канализация / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, А. И. Жуков, С. К. Колобанов. — М. : Стройиздат, 1975. — 633 с.

40. Корецкий, В. Е. Инженерно-экологическая защита водной системы северного мегаполиса в зимний период // Вода : экология и технология : материалы VII Междунар. конгресса ЭКВАТЭК-2006. — М., 2006.

41. Philip H. Jones. Economic and environmental impacts of disposal of kitchen organic wastes using traditional landfill // Waste management research unit Griffith University. — 1994.

42. WasteCap Resource Solutions, Inc. Final Report: Food Waste to Energy and Fertilizer. — Wisconsin Department of Natural Resources. — 2010. — March.

43. Гонопольский, А. М. Технология удаления пищевых отходов из мест их образования / А. М. Гонопольский, Е. В. Зинякина //

- Теория и практика современной науки : матер. IX Междунар. конф. — М. : Спецкнига, 2013. — 18 с.
44. Пат. 2015138407/13(058875) РФ Бытовой измельчитель пищевых отходов / А. М. Гонопольский, Е. В. Зинякина. — Заявл. патент 09.09.2015 г.
45. *Шаповалова, Е. Н.* Хроматографические методы анализа : учеб. пособие / Е. Н. Шаповалова, А. В. Пирогов ; под ред. О. А. Шпигуна. — М. : Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2007. — 109 с.
46. *Курко, В. И.* Хроматографический анализ пищевых продуктов. — М. : Пищ. пром-сть, 1965. — 274 с.
47. *Царев, Н. И.* Практическая газовая хроматография / Н. И. Царев, В. И. Царев, И. Б. Катраков. — Барнаул : АлтГТУ, 2000. — 156 с.
48. *Липавский, В. Н.* Автоматические газовые потоковые хроматографы / В. Н. Липавский, В. Г. Березкин. — М. : Химия, 1982. — 224 с.
49. Р 4.1.1672-03. Руководство по методам контроля качества и безопасности биологически активных добавок к пище (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 30.06.2003).
50. *Столяров, Б. В.* Практическая газовая и жидкостная хроматография : учеб. пособие / Б. В. Столяров, И. М. Савинов, А. Г. Ви-тенберг [и др.]. — СПб. : Изд-во СПбГУ, 2002. — 616 с.
51. *Мусина, О. Н.* Методы исследования состава и свойств пищевых продуктов : лабораторный практикум / О. Н. Мусина, Л. Н. Азолкина, М. П. Щетинин. — Барнаул : АлтГТУ, 2013. — 230 с.
52. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция (введ. 01.01.2013). — М. : Изд-во стандартов, 2012. — 106 с.
53. ГОСТ Р 50527.1-2009 (МЭК 60670-1:2002) Корпусы для аппаратов, устанавливаемые в стационарные электрические установки бытового и аналогичного назначения. Общие требования и методы испытаний (введ. 01.07.2004). — М. : Изд-во стандартов, 2007. — 90 с.
54. ГОСТ 8.586.1-2007. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 1, 2 (утв. Межгос. советом по стандартизации, метрологии и сертификации ; введ. 01.01.2007). — М. : Стандартиформ, 2007. — 49 с.
55. ГОСТ 8.586.1-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 5.

- Методика выполнения измерений (введ. 01.01.2007). — М. : Стандартинформ, 2007. — 45 с.
56. *Стариковская, С. М.* Физические методы исследования : учеб. пособие. Ч. 3. Методы измерения давления. — М. : Изд-во МФТИ, 2005. — 50 с.
57. *Орлов, В. Ю.* Экологический мониторинг. Газоанализаторы для контроля загрязнения : метод. указания / В. Ю. Орлов, Н. С. Швыркова. — Ярославль : ЯрГУ, 2009. — 39 с.
58. ГН 2.2.5.686-98. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы (введ. 04.02.1998). — М. : Стандартинформ, 1998. — 162 с.
59. *Кремлевский, П. П.* Расходомеры и счетчики количества веществ : справочник. Кн. 1. — 5-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Политехника, 2002. — 409 с.
60. *Теперин, А. А.* СД.01. Технические средства автоматизации и управления : конспект лекций по дисциплине. — Казань : Казанский гос. техн. ун-т им. А. Н. Туполева, 2007. — 90 с.
61. МДК 3-01.2001. Методические рекомендации по расчету количества и качества принимаемых сточных вод и загрязняющих веществ в системы канализации населенных пунктов (введ. 06.04.2001). — М. : Стандартинформ, 2001. — 21 с.
62. *Тимонин, А. С.* Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования : справочник. Т. 2. — 2-е изд., перераб. и доп. — Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. — 1030 с.
63. *Бродский, Ю. А.* Вибрационное оборудование для рассева и смешивания сыпучих материалов / Ю. А. Бродский, В. Н. Троицкий // Хлебное дело. — 2001. — № 5 (7). — С. 40–41.
64. *Деревич, И. В.* Анализ пневматического транспорта дисперсных материалов в импульсном режиме подачи газа / И. В. Деревич, А. Ю. Фокина // Инженерный журнал : наука и инновации. — 2012. — № 4. — С. 29.
65. *Яблонский, В. О.* Течение реологически сложной суспензии в цилиндроконическом гидроциклоне / В. О. Яблонский, Г. В. Рябчук // Теоретические основы химической технологии. — 2005. — Т. 39, № 4. — С. 355.
66. *Yang, C.* Numerical simulation of sedimentation of microparticles using the discrete particle method / C. Yang, Y. Ding, D. York, W. Broeckx // Particology. — 2008. — V. 6, № 1. — P. 38.

67. *Yagi, H.* Gas absorption into a slurry accompanied by chemical reaction with solute from sparingly soluble particles / H. Yagi, H. Hikita // The Chemical Engineering Journal. — 1987. — V. 36, № 3. — P. 169.
68. *Ladd, C.* Lattice-Boltzmann Simulations of Particle-Fluid Suspensions / C. Ladd, R. Verberg // Journal of Statistical Physics. — 2001. — V. 104, № 5. — P. 1191.
69. *Aidun, C.* Lattice Boltzmann simulation of solid particles suspended in fluid / C. Aidun, Y. Lu // Journal of Statistical Physics. — 1995. — V. 81, № 1. — P. 49.
70. *Chen, S.* Lattice Boltzmann method for fluid flows / S. Chen, G. Doolen // Annu. Rev. Fluid Mech. — 1998. — V. 30. — P. 329.
71. *Идельчик, И. Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М. : Машиностроение, 1992.
72. *Obrecht, C.* Scalable lattice Boltzmann solvers for CUDA GPU clusters / C. Obrecht, F. Kuznik F., B. Tourancheau, J. Rouxb // Parallel Computing. — 2013. — V. 39, № 6. — P. 259.
73. *Hatwalne, Y.* Rheology of active-particle suspensions / Y. Hatwalne, S. Ramaswamy, M. Rao, R. A. Simha // Phys Rev Lett. — 2004. — V. 92.
74. *Cates, M. E.* Stratford Lattice Boltzmann simulations of liquid crystalline fluids: active gels and blue phases / M. E. Cates, O. Henrich, D. Marenduzzo // Soft Matter. — 2009. — V. 20. — P. 3791–3800.
75. *Ladd, A. J. C.* Numerical Simulations of Particulate Suspensions via a discretized Boltzmann Equation. Numerical results // J. Fluid Mech. — 1994. — P. 271–311.
76. *Weiss, R. G.* Molecular gels: Materials with self-assembled fibrillar networks / R. G. Weiss, P. Terech. — Washington : Springer Science & Business Media, 2006.
77. *Pokusaev, B. G.* Peculiarities of diffusion in gels / B. G. Pokusaev, S. P. Karlov, A. V. Vyazmin, D. A. Nekrasov // Thermophysics and Aeromechanics. — 2013. — V. 20, № 6. — P. 749.
78. *Neuman, S. P.* Perspective on theories of non-Fickian transport in heterogeneous media / S. P. Neuman, D. M. Tartakovsky // Advances in Water Resources. — 2009. — V. 32, is. 5. — P. 670.
79. Пат. 7963469 B2, US. Water recycling food waste disposer system / Steven P. Hanson ; заявитель и патентообладатель Emerson Electric Co. — Оpubл. 11.02.2008.
80. *Гонопольский, А. М.* Технология пульповой переработки и удаления пищевых отходов из мест их образования / А. М. Гонополь-

- ский, Е. В. Зинякина, Д. А. Некрасов [и др.] // Экология и промышленность России. — 2014. — № 12. — С. 4–7.
81. *Петрухин, В. П.* Справочник инженера по охране окружающей среды (эколога) / В. П. Петрухин, З. И. Петрухина, Т. А. Овчарюк. — М. : Инфра-Инженерия, 2005. — 864 с.
82. *Новиков, Ю. В.* Экология, окружающая среда и человек : учебное пособие. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Фаир-Пресс, 2005. — 736 с.
83. *Воронов, Ю. В.* Водоотведение и очистка сточных вод : учебник / Ю. В. Воронов, С. В. Яковлев. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. — 704 с.
84. *Гухман, А. А.* Введение в теорию подобия. — М. : Высш. шк., 1973.
85. *Гонопольский, А. М.* Теория подобия в прикладной инженерной экологии / А. М. Гонопольский, В. Е. Мурашов, К. Я. Кушнир // Экология и промышленность России. — 2007. — Октябрь. — С. 22–25.
86. *Гонопольский, А. М.* Критериальное обобщение результатов экспериментальных исследований процесса ультразвуковой очистки обратноосмотических мембран / А. М. Гонопольский, С. И. Стомпель, К. В. Ладыгин // Экология и промышленность России. — 2014. — № 8. — С. 28–31.
87. *Систер, В. Г.* Критериальное обобщение характеристик технологического процесса очистки сточных вод от тяжелых металлов / В. Г. Систер, А. М. Гонопольский, Е. Г. Кривобородова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2007. — № 3. — С. 34–37.
88. *Лотош, В. Е.* Экология природопользования. — Екатеринбург : Полиграфист, 2001. — 540 с.
89. *Копытина, Н. А.* Биогазовая промышленность России: становление и перспективы развития / Н. А. Копытина, Е. В. Корольков // Высокие технологии. Экология. — Воронеж : Воронежский ГАСУ, 2012. — С. 12–15.
90. РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрхимическим показателям (введ. : 03.12.2002). — М. : Стандартинформ, 2002. — 55 с.
91. СанПиН 2.1.5.980-00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод (введ. 22.06.2000). — М. : Стандартинформ, 2000. — 10 с.

92. *Хахимов, Ф. И.* Рекомендации по утилизации илов городских очистных сооружений / Ф. И. Хахимов, А. С. Керженцев, С. М. Севостьянов. — М. : ГоскомЭкология России, 1999. — 52 с.
93. *Кожин, В. Ф.* Очистка питьевой и технической воды. Примеры и расчеты : учеб. пособие. — 4-е изд., репринтное. — М. : БАСТЕТ, 2008. — 304 с.
94. *Пеньков, М. М.* Природный газ. Метан : справочник. — СПб. : НПО Профессионал, 2006. — 848 с.
95. *Смиренская, В. Н.* Химическая технология вяжущих материалов : учеб. пособие / В. Н. Смиренская, С. А. Антипина, С. Н. Соколова. — Томск : ТПУ, 2010. — 200 с.
96. Degremont. Технический справочник по обработке воды : пер. с франц. В 2 т. Т. 1. — СПб. : Новый журнал, 2007. — 920 с.
97. СП 32.13330.2012. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения (введ. 29.12.2011). — М. : Стандартинформ, 2011. — 97 с.
98. *Калыгин, В. Г.* Экологическая безопасность в техносфере. Термины и определения : справ. пособие. — М. : Химия ; КолосС, 2008. — 368 с.
99. Об утверждении норматива накопления твердых бытовых отходов : Постановление Правительства Москвы от 23.11.2004 г. № 810-ПП (введ. 01.01.2005). — М., 2005. — 1 с.
100. Методика прогнозирования морфологического состава твердых бытовых отходов Москвы / Д. С. Якшилов, Г. В. Козлов, А. В. Гарабаджиу [и др.] // Известия Санкт-Петербург. гос. технологического ин-та (технического ун-та). — 2010. — № 7. — С. 77–79.
101. *Гонопольский, А. М.* Особенности гидродинамики концентрированных водных суспензий в гладкой трубе / А. М. Гонопольский, Е. В. Зинякина, Д. А. Некрасов [и др.] // ТОХТ. — 2015. — № 2 (49). — С. 169–174.
102. *Гонопольский, А. М.* Технология удаления пищевых отходов из мест их образования / А. М. Гонопольский, Е. В. Зинякина // Теория и практика современной науки : матер. IX Междунар. конф. — М. : Спецкнига, 2013. — С. 18–21.
103. *Сахно, Н. В.* Методика определения прочности костей животных с использованием испытательных машин // Сельскохозяйственная биология. — 2008. — № 6. — С. 122–125.
104. *Николайкина, Н. Е.* Промышленная экология. Инженерная защита биосферы от воздействия воздушного транспорта : учеб. по-

- собие / Н. Е. Николайкина, Н. И. Николайкин, А. М. Матягина. — М. : Академкнига, 2006. — 239 с.
105. ГОСТ Р 52033-2003. Автомобили с бензиновыми двигателями. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами. Нормы и методы контроля при оценке технического состояния (введ. 27.03.2003). — М. : Стандартиформ, 2003. — 9 с.
106. ГОСТ Р 17.2.2.06-99. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерения содержания оксида углерода и углеводородов в отработавших газах газобаллонных автомобилей (введ. 16.11.1999). — М. : Изд-во стандартов, 2004. — 8 с.
107. *Гонопольский, А. М.* Исследование конструктивных параметров шарошечного измельчителя пищевых отходов / А. М. Гонопольский, Е. В. Зинякина // Вестник РАЕН. — 2016. — № 1. — С. 71–75.
108. SOLIDWORKS Flow Simulation [Электрон. данные]. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа : [//www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm](http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm)
109. Пат. 7963469 B2, US. Water recycling food waste disposer system / Steven P. Hanson ; заявитель и патентообладатель Emerson Electric Co. — Оpubл. 11.02.2008.
110. *Алямовский, А. А.* Solid Works Simulation. Как решать практические задачи. — СПб. : БХВ-Петербург, 2012. — 448 с.
111. *Pokusaev, B. G.* Hydrodynamic Peculiarities of Concentrated Water Suspensions in Smooth Pipe / B. G. Pokusaev, A. M. Gonopol'skii, D. A. Nekrasov [et al.] // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. — 2015. — Vol. 49, № 2. — P. 163–168.
112. *Steinberg, D. S.* Vibration Analysis for Electronic Equipment. — N. Y. : John Wiley & Sons Inc., 2000.
113. *Афонин, В. К.* Металлы и сплавы : справочник / В. К. Афонин, Б. С. Ермаков, Е. Л. Лебедев [и др.] ; под ред. Ю. П. Солнцева. — СПб. : Мир и семья, 2003. — 1066 с.
114. *Ржаницын, А. Р.* Составные стержни и пластинки. — М. : Стройиздат, 1986. — 316 с.
115. *Готовский, М. А.* Тепломассобмен в технологических установках ЦБП. Ч. 1 // М. А. Готовский, В. А. Суслов. — СПб. : СПбГТУРП, 2010. — 88 с.
116. *Пестрецов, С. И.* Компьютерное моделирование и оптимизация процессов. — Тамбов : Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2009. — 104 с.

117. Яковлев, С. В. Канализация : учебник / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, А. И. Жуков [и др.]. — Изд. 5-е, перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1975. — 632 с.
118. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. — М. : ЦИТП Госстроя СССР, 2000. — 112 с.
119. Шариков, Л. П. Охрана окружающей среды : справочник. — Л.: Судостроение, 1978. — 560 с.
120. Лапицкая, М. П. Очистка сточных вод (примеры расчетов) : учеб. пособие. — Минск : Высш. шк., 1983. — 255 с.
121. Конторович, З. Б. Машины химической промышленности. Т. 1. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М. : Машгиз, 1952. — 744 с.
122. Шарипов, Л. Х. Технологические схемы и оборудование дробильно-сортировочных предприятий: выбор, расчет : учеб. пособие. — Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1997. — 184 с.
123. Романов, Ю. А. Стволовые клетки в современной медицине: настоящее и будущее // Открытое образование. — 2006. — № 3. — С. 89–92.
124. Белинцев, Б. Н. Физические основы биологического формообразования. — М. : Наука ГРФМЛ, 1991. — 253 с.
125. Романовский, Ю. М. Что такое математическая биофизика / Ю. М. Романовский, Н. В. Степанова, Д. С. Чернавский. — М. : Просвещение, 1971. — 136 с.
126. Варфоломеев, С. Д. Биокинетика / С. Д. Варфоломеев, К. Г. Гуревич. — М. : ФАИР ПРЕСС, 1999. — 716 с.
127. Stathopoulos, N. A. Shear-stress effects on human-embryonic kidney-cells in vitro / N. A. Stathopoulos, J. D. Hellums // Biotechnology and Bioengineering. — 1985. — Vol. 27. — P. 1021–1026.
128. Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод. — М. : Наука ГРФМЛ, 1977. — 664 с.
129. Полянин, А. Д. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массообмена / А. Д. Полянин, А. В. Вязьмин, А. И. Журов [и др.]. — М. : Факториал, 1998. — 368 с.
130. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Корн Г., Корн Т. — СПб. : Лань, 2003. — 832 с.
131. Бутковский, А. Г. Характеристики систем с распределёнными параметрами. — М. : Наука ГРФМЛ, 1979. — 224 с.
132. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. — М. : Наука, 1987.
133. Аэров, М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. — Л. : Химия, 1979.

134. *Fan, L. S.* Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering. — Boston : Butterworths, 1989.
135. *Beenackers, A. A. C. M.* Mass Transfer in Gas-Liquid Slurry Reactors / A. A. C. M. Beenackers, W. P. M. Van Swaaij // Chem. Eng. Sci. — 1993. — V. 48. — P. 3109–3139.
136. *Hessel, V.* Chemical Micro Process Engineering / V. Hessel, H. Lowe, A. Muller [et al.] ; eds. Renken A.— Weinheim : Wiley VCH, 2005.
137. *Покусаев, Б. Г.* Процессы переноса в снарядном режиме течения трехфазных сред / Б. Г. Покусаев, А. А. Зайцев, В. А. Зайцев // Теорет. основы хим. технологии. — 1999. — Т. 33, № 6. — С. 595.
138. *Mironov, V.* Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering / V. Mironov, T. Boland, T. Trusk T.[et al.] // Trends in Biotechnology. — 2003. — V. 21. — P. 157–161.
139. *Jakab, K.* Tissue engineering by self-assembly and bio-printing of living cells / K. Jakab, C. Norotte, F. Marga [et al.] // Biofabrication 2010. — V. 2. — P. 20–34.
140. *Orell, A.* A Model for Gas-Liquid Slug Flow in a Vertical Tube / A. Orell, R. Rembrand // Ind. Eng. Chem. Fundam. — 1986. — V. 25. — P. 196–206.
141. *Taitel, Y.* Slug flow modeling for downward inclined pipe flow theoretical considerations / Y. Taitel, C. Saricab, J. P. Brill // International Journal of Multiphase Flow. — 2000. — V. 26. — P. 833–844.
142. *Hu, X. Y.* A multi-phase SPH method for macroscopic and mesoscopic flows / X. Y. Hu, N. A. Adams // J. of Comp. Phys. — 2006. — V. 213. — P. 844–861.
143. *Das, A. K.* Bubble evolution through submerged orifice using smoothed particle hydrodynamics: Basic formulation and model validation / A. K. Das, P. K. Das // Chem. Eng. Sci. — 2009. — V. 64. — P. 2281–2290.
144. *Jeong, J. H.* Smoothed particle hydrodynamics Applications to heat conduction / J. H. Jeong, M. S. Jhona, J. S. Halowb [et al.] // Comp. Phys. Comm. — 2003. — V. 153. — P. 71–84.
145. *Monaghan, J. J.* Smoothed Particle Hydrodynamics and Its Diverse Applications // Annu. Rev. Fluid Mech. — 2012. — V. 44. — P. 323–346.
146. *Zhu, Y.* Smoothed Particle Hydrodynamics Model for Diffusion through Porous Media / Y. Zhu, J. F. Patrick // Transport in Porous Media. — 2001. — V. 43. — P. 441–447.

147. *Liu, G. R.* Smoothed Particle Hydrodynamics: a meshfree particle method / G. R. Liu, M. B. Liu. — Singapore : World Scientific, 2003.
148. *Amada, T.* Particle-based fluid simulation on GPU / T. Amada, M. Imura, Y. Yasumuro [et al.] // Proc. of ACM Workshop on General-purpose Computing on Graphics Processors. — Los Angeles, 2004. — P. 342.
149. *Monaghan, J. J.* Simulating free surface flows with SPH // J. of Comp. Phys. — 1994. — V. 110. — P. 399–406.
150. *Monaghan, J. J.* Smoothed particle hydrodynamics // Rep. Prog. Phys. — 2005. — V. 68. — P. 1703–1759.
151. *Покусаев, Б. Г.* Скорость движения газового снаряда в наклонных трубах / Б. Г. Покусаев, Д. А. Казенин, С. П. Карлов [и др.] // Теорет. основы хим. технологии. — 2011. — Т. 45, № 5. — С. 550.
152. *Абиев, Р. Ш.* Моделирование потерь давления при снарядном течении газожидкостной смеси в мини- и микроканалах // Теорет. основы хим. технологии. — 2011. — Т. 45, № 2. — С. 170.
153. *Покусаев, Б. Г.* Экспериментальное и численное моделирование межфазного массообмена газового пузыря в зернистой засыпке и геле / Б. Г. Покусаев, Д. А. Некрасов, С. П. Карлов [и др.] // ТОХТ. — 2016. — Т. 50, № 5. — С. 508–515.
154. *Keita, E.* Evaporation from a capillary tube: Experiment and modelization / E. Keita, P. Faure, S. Rodts [et al.] // 5th International Conference on Porous Media and Their Applications in Science, Engineering and Industry. — 2014. — P. 50–57.
155. *Berlin, J.* Injectable Hydrogelbased Medical Devices // Orthoworld. — 2010. — Vol. 9, № 3. — P. 120–126.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.	3
Глава 1. Аналитический обзор проблем обращения с пищевыми отходами.	7
1.1. Аналитический обзор технологий переработки пищевых отходов.	7
1.1.1. Технология микробиологической биоконверсии	7
1.1.2. Биоэнергетические методы утилизации	8
1.1.3. Экструзионная переработка пищевых отходов	9
1.1.4. Вермикультурная переработка пищевых отходов	11
1.2. Аналитический обзор оборудования для переработки пищевых отходов.	11
1.2.1. Биогазовая установка сбраживания пищевых отходов.	11
1.2.2. Микробиологический реактор для переработки пищевых отходов.	12
1.2.3. Бытовой метантенк.	14
1.2.4. Аппарат для последовательного пофазного анаэробного сбраживания.	17
1.2.5. Диспоузер.	18
1.3. Обзор систем сбора пищевых отходов с целью их последующей утилизации.	20
1.3.1. Организация системы вывоза пищевых отходов.	20
1.3.2. Организация сбора пищевых отходов кухонь, столовых и ветеринарно-санитарный контроль за их использованием при кормлении животных.	21
1.4. Эффективность организационно-технических системы сбора и переработки пищевых отходов.	22
Глава 2. Результаты исследований технологии пульповой переработки и удаления пищевых отходов из мест их образования.	25
2.1. Характеристики стенда и методики исследований технологического процесса пульповой переработки пищевых отходов.	25
2.2. Описание используемого исследовательского оборудования.	27
2.3. Результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований свойств пульпы.	30

2.4. Результаты экспериментальных исследований потоков пульпы пищевых отходов	36
2.5. Результаты расчетно-теоретических исследований потоков пульпы.	39
2.6. Исследование конструктивных и эксплуатационных параметров шарошечного измельчителя пищевых отходов.....	53
Глава 3. Влияние канализационной транспортировки пульпы пищевых отходов на характеристики	
городских очистных сооружений.	72
3.1. Оценка количества осадка из пульпы пищевых отходов в стоках.	72
3.1.1. Расчёт объёма образуемого сырого осадка	73
3.1.2. Избыточный активный ил.	74
3.1.3. Химический ил.	74
3.2. Анализ потребности в оборудовании для обработки осадков из пульпы органических отходов легкой промышленности.	75
3.2.1. Технологический расчет сгустителей сырого осадка.	75
3.2.2. Этап механического сгущения избыточного активного и химического ила	76
3.3. Расчет метантенков для сбраживания пульпы органических отходов легкой промышленности	78
3.4. Механическое обезвоживание осадков из пульпы органических отходов легкой промышленности	84
3.5. Обеззараживание осадков сточных вод из пульпы органических отходов легкой промышленности	86
Глава 4. Предложения по реализации результатов исследований.	89
4.1. Инженерная методика масштабирования шарошечных измельчителей пищевых отходов	89
4.2. Расчет конструктивных параметров шарошечных измельчителей	92
4.3. Предложения по удалению пульпы пищевых отходов через канализационные системы предприятий общественного питания.	95
4.4. Предложения по удалению пульпы пищевых отходов через канализационные системы предприятий пищевой промышленности.	98

4.5. Сравнительный технико-экономический анализ автомобильной транспортировки пищевых отходов в составе ТБО и канализационного удаления после пульповой переработки	100
Глава 5. Двухфазные потоки в биотехнологиях и гелях	102
5.1. Микробиореактор для культивирования стволовых клеток	102
5.2. Области влияния источника примеси в фильтрационных потоках	106
5.3. Межфазный массообмен в зернистой засыпке и геле	111
5.4. Исследование процесса формирования и старения геля	123
Список использованной литературы	127

*Адам Михайлович ГОНОПОЛЬСКИЙ,
Борис Григорьевич ПОКУСАЕВ,
Екатерина Викторовна КОРНЕВА,
Дмитрий Анатольевич НЕКРАСОВ,
Дмитрий Петрович ХРАМЦОВ*
ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ В ЭКОТЕХНОЛОГИЯХ
Монография

Зав. редакцией
естественнонаучной литературы *М. В. Рудкевич*
Ответственный редактор *С. В. Макаров*
Подготовка макета *О. О. Николаева*
Корректор *Т. Ю. Смирнова*
Выпускающий *Н. А. Крылова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб
Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com;
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, 1, лит. А.
Тел.: (812) 412-92-72, 336-25-09.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 04.05.18.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108¹/₃₂.
Печать офсетная. Усл. п. л. 7,56.