

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 502.174.1

**ОПИМАХ**  
**Евгений Владимирович**

**ФЛОТАЦИОННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СМЕСИ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ  
ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.17.08 – процессы и аппараты химических технологий

Минск 2017

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» на кафедре процессов и аппаратов химических производств.

Научный руководитель

**Левданский Александр Эдуардович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических производств учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

**Шаповалов Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор Института механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, заведующий отделом 1 «Композиционные материалы и рециклинг полимеров»;

**Волк Анатолий Матвеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация

ОАО «Белгорхимпром» (г. Минск)

Защита состоится 27 сентября 2017 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет», 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, в аудитории 240 корпуса 4. Тел. 8 (017) 226-00-39; факс 8 (017) 227-62-17, электронная почта: root@belstu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан 25 августа 2017 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук



М. В. Дяденко

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимерные материалы занимают лидирующее положение по объему производства из числа сырьевых материалов. Это объясняется их технологичностью, легкостью, удобством, экономичностью, набором ценнейших эксплуатационных свойств. Увеличение объемов производства и потребления полимерных материалов приводит к росту количества их отходов, основная масса которых уничтожается неэффективными способами, ведущими к загрязнению окружающей среды вредными и ядовитыми веществами: захоронение на полигонах (свалках) и затопление. Для достижения определенных свойств в полимеры вводят химические добавки, а ряд из них относят к токсичным материалам. Даже при использовании систем очистки данный вид утилизации не способен полностью избавить воздух и воду от загрязнений. В результате ценное полимерное сырье закапывается в землю или затапливается, а огромные территории становятся непригодными для рационального использования. Все это делает вопрос утилизации отходов полимерных материалов весьма актуальным. Утилизация полимерных отходов может быть рассмотрена как важный экономический фактор, так как материалы и энергия используются повторно, что позволяет уменьшить потребление природных ресурсов, энергии и снизить выбросы в окружающую среду. Следовательно, полезное использование вторичного сырья как источника дополнительных ресурсов – одно из наиболее активно развивающихся направлений переработки полимерных отходов в мире.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Исследования, выполненные по теме диссертации, проводились в рамках научно-исследовательской работы по гранту Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по теме «Флотационное разделение смеси измельченных пластмасс» (№ госрегистрации 20150832, 2015–2017 гг.), а также в рамках научно-исследовательских работ ГБ 17–06 «Особенности механического поведения гетерогенных, дисперсных и композиционных систем», ГБ 32–11 «Исследование и разработка новых технических решений по интенсификации процессов теплообмена, разделения и смешения многофазных систем, а также методов расчета аппаратов и их оптимизации», ГБ 32–16 «Разработка, исследование новых и усовершенствование существующих технических решений и методик расчета механических, гидромеханических, тепловых и массообменных процессов».

### **Цель и задачи исследования**

*Цель диссертационного исследования* – разработка способа флотационного разделения смеси измельченных пластмасс, основанного на свойстве их избирательной смачиваемости, и создание установки для его реализации.

*Задачи исследования:*

- провести анализ работ по теории и практике переработки пластмассовых отходов с установлением недостатков существующих методов и обоснованием необходимости создания нового способа флотационного разделения смеси измельченных вторичных полимеров и его аппаратного оформления;

- разработать новый способ флотационного разделения смеси измельченных вторичных полимеров, основанный на свойстве их избирательной смачиваемости с использованием поверхностно-активных веществ, и конструкцию флотационной установки для его осуществления;

- на основе теоретического анализа процессов флотационного разделения определить области экспериментального исследования, требования к лабораторной установке и методику проведения экспериментов;

- провести экспериментальные исследования и установить закономерности процесса флотационного разделения различных смесей измельченных вторичных полимеров в зависимости от технологических и конструктивных параметров;

- создать и испытать опытный образец колонного флотационного аппарата с пневматической аэрацией для разделения смеси измельченных вторичных полимеров, провести технико-экономический анализ эффективности данных решений и предложить рекомендации для его внедрения;

- разработать методику инженерного расчета конструктивных и технологических параметров флотационной установки.

### **Научная новизна**

Обоснован и разработан способ флотационного разделения смеси измельченных вторичных полимеров, основанный на различной смачиваемости материалов в присутствии флотореагентов.

Получены математические зависимости, описывающие процесс аэрации рабочего объема аппарата, которые при известных свойствах флотируемого материала позволяют оценить возможность проведения процесса флотационного разделения смеси измельченных пластмасс в колонном аппарате с пневматической аэрацией.

Установлены закономерности влияния технологических параметров (расхода воздуха, температуры рабочей жидкости, концентрации поверхностно-активных веществ, высоты слоя аэрируемой жидкости в рабочем объеме аппарата) на флотационное разделение (на степень извлечения флотируемого компонента, чистоту концентрата) смеси измельченных пластмасс в присутствии флотореагентов.

На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана инженерная методика расчета основных параметров процесса и установки

флотационного разделения смеси измельченных вторичных полимеров, плотности которых больше плотности рабочей среды и близкие или равные между собой, в диапазоне от 1000 до 1250 кг/м<sup>3</sup> (акрилонитрил бутадиен стирол, полистирол, полиамид, поликарбонат, полиметилметакрилат).

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Новый способ флотационного разделения смеси измельченных пластмасс, плотность которых больше, чем плотность рабочей жидкости, и конструктивные решения флотационной установки для его осуществления, позволяющие извлекать один или несколько типов пластмасс путем изменения гидрофильности-гидрофобности определенного компонента или компонентов смеси пластмасс при использовании поверхностно-активных веществ.

2. Математические зависимости, учитывающие стесненное взаимодействие фаз, соотношение объемов дисперсных фаз в комплексе, условие всплытия комплекса «пузырек – частица» и условие равновесия пузырька на твердой частице, что позволяет(ло) определить рациональные технологические и конструктивные параметры пневматического аэратора.

3. Закономерности влияния на процесс флотационного разделения смеси измельченных пластмасс концентрации поверхностно-активных веществ (синтанола, сульфанола, смеси, содержащей натрий лауретсульфат и диэтаноламид), расхода воздуха, высоты аэрируемого слоя рабочей жидкости и ее температуры на чистоту концентрата и извлечение флотируемого компонента.

4. Результаты экспериментальных исследований по флотационному разделению смеси измельченных пластмасс, позволяющие при использовании колонного аппарата с пневматической аэрацией извлекать флотируемый компонент с чистотой концентрата до 99%.

5. Результаты промышленных испытаний полупромышленного колонного флотационного аппарата с пневматической аэрацией и производительностью по исходной смеси до 32 кг/час, в условиях ОАО «Белвторполимер» с использованием которого осуществлено извлечение флотируемого компонента с чистотой концентрата 97–99%.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Все результаты работы получены соискателем самостоятельно. Соискатель принимал участие в постановке задач исследований. Им проведен анализ состояния техники разделения пластмассовых отходов в Республике Беларусь и за рубежом, обзор теоретических работ по исследуемому вопросу, определены пути дальнейшего совершенствования техники разделения пластмассовых отходов. Соискатель принимал активное участие в разработке нового способа флотационного разделения смеси измельченных пластмасс и аппарата для его осуществления. Автором спроектирована и изготовлена лабораторная установка

флотационного колонного аппарата с пневматической аэрацией и все экспериментальные исследования проведены лично им. Обработка опытных данных с получением математических зависимостей для расчета полупромышленного аппарата также проведена соискателем. Автором осуществлено проектирование полупромышленного образца флотационного колонного аппарата с пневматической аэрацией, курировалось его изготовление, также он активно участвовал в промышленных испытаниях.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2013) (Гомель, 2013 г.); 77-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (Минск, 2013 г.); X Международной научно-технической конференции «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии» (Гродно, 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Развитие науки, образования и культуры независимого Казахстана в условиях глобальных вызовов современности», посвященной 70-летию Южно-Казахстанского государственного университета им. М. Ауэзова (Шымкент, 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Ауэзовские чтения – 12: Роль регионального университета в развитии инновационных направлений науки, образования и культуры» (Шымкент, 2014 г.); 78-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием) (Минск, 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (Минск, 2014 г.); 79-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием) (Минск, 2015 г.); Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2015) (Гомель, 2015 г.); Международной научно-технической конференции «Сто конкретных шагов. Современное государство для всех» – стратегический путь индустриально-инновационного развития страны» (Шымкент, 2015 г.); 80-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием) (Минск, 2016 г.); 81-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием) (Минск, 2017 г.).

#### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертационной работы изложены в 4 научных статьях, в материалах 4 конференций и тезисах 8 докладов. Подана заявка на получение

ние патента Республики Беларусь «Способ флотационного разделения смеси измельченных пластмасс». Объем публикаций в рецензируемых журналах составляет 1,39 авторского листа, общий объем публикаций составляет 2,87 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений, содержит 60 иллюстраций и 4 таблицы. Список использованных источников имеет 236 наименований, из которых авторских работ – 17. Полный объем диссертации – 173 страниц.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

В первой главе проведен анализ существующих методов рециклинга полимерных материалов. Использование вторичного сырья в качестве новой ресурсной базы – наиболее рациональное направление переработки полимерных материалов. Однако не все направления использования вторичного полимерного сырья одинаково перспективны. Сжигание отходов приводит к безвозвратной потере ценного химического сырья, загрязнению окружающей среды вредными веществами дымовых газов. Способы термического разложения имеют низкую рентабельность, поскольку общая стоимость переработки включает в себя стоимость затраченной энергии, химических реагентов и катализаторов, стадий сбора, разделения, пред- и постпроцессинговой обработки. Механическая переработка отходов полимерных материалов наиболее выгодна и предпочтительна с технической, экономической и экологической точек зрения. Однако на сегодняшний день из образующихся полимерных отходов механической переработке подвергается только незначительная их часть из-за трудностей, связанных с разделением смешанных отходов, поскольку пластмассы, входящие в состав мусора, часто несовместимы. Полимерные примеси приводят к ухудшению внешнего вида деталей, получаемых из отходов, снижению качества поверхности и физико-механических показателей. Поэтому требуется их постадийное разделение.

Проведен анализ методов, доступных для разделения отходов пластмасс. Установлено, что любой из рассмотренных методов не удовлетворяет всем требованиям. Перспективными процессами разделения являются флотационные на основе различной смачиваемости, поскольку довольно просты аппаратурно и надежны. Процесс флотации более совершенен, чем седиментация в флотационных ваннах, который широко используется в нашей республике и в мире. Флотационный процесс может позволить осуществлять разделение пластмасс с довольно близкими или равными плотностями. Для этого необходимо наличие поверхностно-активных веществ и пузырьков газа в рабочем объеме аппарата.

На основе литературных данных о способах флотации и их аппаратному оформлению предложена наиболее полная схема классификации существующих процессов флотации. Выполнен анализ существующих методов флотации и областей их применения в производстве. На основе проведенного анализа установлено, что в качестве наиболее эффективного, простого в изготовлении и эксплуатации, а также недорогого способа флотации для разделения смеси измельченных пластмасс целесообразно использовать пневматическую аэрацию жидкости в колонном аппарате. Данные о влиянии каких-либо факторов на флотационное разделение смесей измельченных пластмасс, которые могут быть полезны как с научной, так и с практической точки зрения, не встречаются в литературе. По этой причине сделан вывод о необходимости разработать и исследовать способ флотационного разделения смеси измельченных пластмасс.

Во второй главе диссертации приведены теоретические основы разработки флотационного способа разделения смеси измельченных полимерных отходов.

На уровне изобретения [16] предложен способ флотационного разделения смеси измельченных пластмасс путем подачи пузырьков газа в рабочий объем и изменения гидрофильности или гидрофобности определенного компонента либо компонентов смеси пластмасс с помощью поверхностно-активных веществ. При этом осуществляют разделение смеси измельченных пластмасс, плотности которых могут быть близкими или равными между собой и больше чем плотность рабочей среды. В процессе флотации всплывшие измельченные частицы гидрофобной пластмассы отводят вместе с пеной в верхней части флотационного аппарата в качестве концентрата, а осевшие измельченные частицы гидрофильной пластмассы – в качестве осадка.

Выполнен анализ факторов, влияющих на процесс флотации. Некоторые параметры колонного аппарата были выбраны с использованием уже имеющихся в литературе данных и общелогических подходов: постоянная по высоте круглая форма поперечного сечения колонного флотационного аппарата; расположение питателя исходной смеси пластмасс и рабочей жидкости соосно колонне в верхней ее части навстречу восходящему потоку пузырьков; подача ПАВ в поток рабочей жидкости; способ отбора пенного продукта – самотеком, при этом должна осуществляться циркуляция рабочей жидкости водяным насосом. Были приняты и обоснованы допущения о том, что парциальное давление, а также диффузия газа и ПАВ, растворенных в жидкости, оказывают незначительное влияние на процесс флотации.

Для рассмотрения сил, действующих на частицу, пузырек или комплекс «пузырек – частица» (для краткости и обобщения далее – *дисперсная фаза*), в данной работе используется метод Лагранжа. Уравнение движения одиночной дисперсной фазы выглядит следующим образом (формула (1)):

$$m_2 \frac{d\vec{u}_2}{dt} = \vec{F}_{\text{дв}} + \vec{F}_c + \vec{F}_{\text{virtual}} + \vec{F}_{\text{lift}} + \vec{F}_{\text{pressure}} + \vec{F}_{\text{dispersion}} + \dots, \quad (1)$$

где  $m_2$  – масса дисперсной фазы, кг;

$\vec{u}_2$  – скорость дисперсной фазы, м/с;

$\vec{F}_{\text{дв}}$  – движущая сила, обусловленная разностью сил тяжести ( $\vec{F}_T$ ) и Архимеда ( $\vec{F}_A$ ), Н;

$\vec{F}_c$  – сила, обусловленная сопротивлением сплошной среды, Н;

$\vec{F}_{\text{virtual}}$  – сила, создаваемая виртуальным массовым эффектом, Н;

$\vec{F}_{\text{lift}}$  – подъемная сила, обусловленная градиентом относительной скорости по поверхности дисперсной фазы, Н;

$\vec{F}_{\text{pressure}}$  – сила, возникающая из-за градиента давления, Н;

$\vec{F}_{\text{dispersion}}$  – турбулентная дисперсионная сила, обусловленная движением турбулентных вихрей, Н.

Другие силы также могут быть добавлены в уравнение, например силы термодиффузии, фотодиффузии, Броуновская сила и др. Силы  $\vec{F}_T$ ,  $\vec{F}_A$ ,  $\vec{F}_c$ ,  $\vec{F}_{\text{virtual}}$ ,  $\vec{F}_{\text{lift}}$ , действующие на дисперсную фазу в нестационарном потоке дисперсионной фазы с полем скорости  $\vec{u}_1^{(i)}$ , показаны на рисунке 1.

Однако различные ученые в своих работах делают выводы о том, что сила сопротивления имеет гораздо более значительный эффект в отличие от других сил, действующих на дисперсную фазу. Предположим, что в рабочем объеме колонного флотационного аппарата поле скорости однородно, стационарно, в нем отсутствуют турбулентные вихри. Следовательно подъемная сила  $\vec{F}_{\text{lift}}$ , турбулентная дисперсионная сила  $\vec{F}_{\text{dispersion}}$  и сила  $\vec{F}_{\text{pressure}}$ , возникающая из-за градиента давления, будут отсутствовать.

Полагаем, что дисперсная фаза движется равномерно, поскольку время релаксации (за которое достигается постоянная скорость) ничтожно мало. Это возможно при сохранении сферической формы пузырьками газа при их движении. Тогда формула (1) будет иметь вид формулы (2)

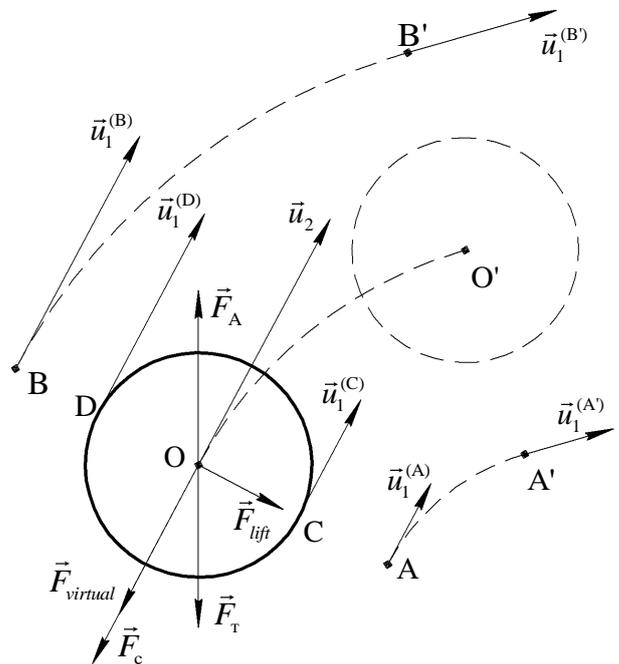


Рисунок 1. – Силы, действующие на дисперсную фазу в нестационарном потоке

$$\frac{3\mu_1 C_D \operatorname{Re}(\vec{u}_2 - \vec{u}_1)}{4d_2^2} = \vec{g}(\rho_1 - \rho_2) \quad (2)$$

где  $\mu_1$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$C_D$  – коэффициент сопротивления;

$\operatorname{Re}$  – относительное число Рейнольдса;

$\vec{u}_1$  – скорость дисперсионной фазы, м/с;

$d_2$  – диаметр дисперсной фазы, м;

$\vec{g}$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$\rho_1$  – плотность дисперсионной фазы (плотность среды), кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2$  – плотность дисперсной фазы, кг/м<sup>3</sup>.

Относительное число Рейнольдса определяют по формуле (3)

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho_1 d_2 |\vec{u}_2 - \vec{u}_1|}{\mu_1}. \quad (3)$$

Равномерное движение пузырька возможно в случае, когда он сохраняет сферическую форму. Форму пузыря можно определить с помощью значений чисел Рейнольдса, Мортон и Этвеша (Бонда). Сферичность пузырька может сохраняться вплоть до числа Рейнольдса, равного 300. Увеличение размеров газового пузырька, при которых число Рейнольдса будет более 300, усиливает динамическое воздействие жидкой среды и снижает влияние силы поверхностного натяжения на форму пузырька. При этом проявляются эффекты пульсации формы пузырька из-за внутренних циркуляций газа. Происходит деформация пузырька и отклонение его формы от сферической. Неустойчивость формы пузырька приводит к изменениям скорости и нарушениям вертикальной траектории его всплытия. Для процесса флотации крупных трудноизвлекаемых частиц такая траектория движения является нежелательной, поскольку происходит отрыв частицы от пузырька под влиянием турбулентности. Следовательно, флотационное разделение смеси измельченных пластмасс необходимо осуществлять при выполнении условия  $\operatorname{Re} < 300$ .

В работе рассмотрены различные модели для определения коэффициента сопротивления (Шиллера – Неймана, Морси, Хайдера, Ишии, Грейса, Томияма, модели для твердых частиц, универсальные модели, закон Стокса). Сравнивались решения некоторых из перечисленных моделей с экспериментальными данными. В результате анализа выбрана модель Ишии (формула (4)):

$$C_D = \max \left\{ \frac{24}{\operatorname{Re}} (1 + 0,15 \operatorname{Re}^{0,75}); \min \left\{ \frac{2}{3} \sqrt{Eo}; \frac{8}{3} \right\} \right\}, \quad (4)$$

где  $E_0$  – число Этвеша, показывающее отношение между силами гравитационного и поверхностного натяжения.

Подставляя формулу (4) в уравнение (2), а также учитывая условие сферичности пузырька и выражение (3), получена система уравнений (5) с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} \frac{18\mu_1(1 + 0,15\text{Re}^{0,75})(\vec{u}_2 - \vec{u}_1)}{d_2^2} = \vec{g}(\rho_1 - \rho_2); \\ \text{Re} = \frac{\rho_1 d_2 |\vec{u}_2 - \vec{u}_1|}{\mu_1} = 300. \end{cases} \quad (5)$$

С помощью системы (5) можно определить максимально допустимую относительную скорость движения сферического пузырька и его соответствующий диаметр. В нашем случае корнями системы уравнений являются  $(u_2 - u_1) = 0,18$  м/с и  $d_2 = 2,2$  мм.

Было учтено гидродинамическое взаимодействие объектов между собой. Для этого была использована модель, описываемая формулой (6)

$$\vec{\omega}_{\text{ст}} = -C_{\text{ст}}(\vec{u}_2 - \vec{u}_1) \left( \frac{\varphi^{\frac{1}{3}} - 1}{\varphi^{\frac{2}{3}} - 1} - \frac{\varphi^{\frac{5}{3}} - 1}{W \left( \varphi^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} - \frac{W}{Y} \right), \quad (6)$$

где  $\vec{\omega}_{\text{ст}}$  – относительная скорость стесненного всплытия дисперсной фазы, м/с;

$C_{\text{ст}}$  – коэффициент стесненной скорости, определяемый эмпирической формулой или константой (обычно для частицы – 2/3, для пузырька – 1);

$\varphi$  – объемная доля дисперсной фазы над аэратором (газосодержание);

$W$  и  $Y$  – параметры которые рассчитываются по формулам (7):

$$Y = 2 + \frac{2}{\mu_{\text{отн}}} + \varphi^{\frac{5}{3}} \left( 3 - \frac{2}{\mu_{\text{отн}}} \right), \quad W = 3 + \frac{2}{\mu_{\text{отн}}} + \frac{2}{\pi} \varphi^{\frac{5}{3}} (\mu_{\text{отн}} - 1), \quad (7)$$

где  $\mu_{\text{отн}}$  – относительная вязкость фаз, равная отношению вязкостей дисперсной и дисперсионной фаз  $\mu_2/\mu_1$ . Для твердой частицы в жидкости или газе  $\mu_2/\mu_1 \rightarrow \infty$ . Тогда  $Y \rightarrow 2$ , а  $W \rightarrow 3$ .

Увеличение объемной доли дисперсной фазы приводит к снижению ее относительной скорости из-за роста силы сопротивления при замещении объемов во встречном потоке жидкости. Число Рейнольдса при таком движении будет

уменьшаться с увеличением объемной доли дисперсной фазы. Поэтому условие сферичности пузырька будет выполняться, даже если диаметр пузырька будет больше, чем рассчитанный ранее. Конечный размер зависит от оптимального газо содержания (расхода), который определяется экспериментально.

Движение комплекса «пузырек – частица» рассматривалось как движение твердой частицы неправильной формы с плотностью  $\rho_k$ , определяемой по формуле (8):

$$\rho_k = \frac{\rho_p V_p + \rho_c V_c}{V_p + V_c}, \quad (8)$$

где  $\rho_p$  и  $\rho_c$  – плотности пузырька и частицы соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

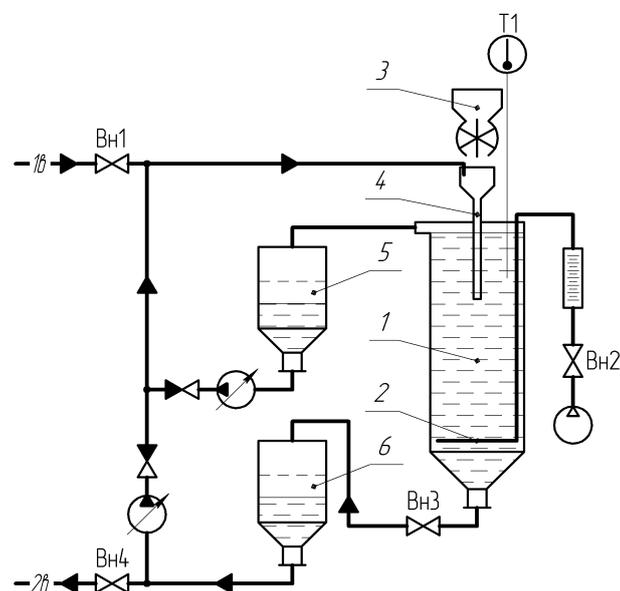
$V_p$  и  $V_c$  – объемы пузырька и частицы соответственно, м<sup>3</sup>.

Определен максимальный эквивалентный диаметр частицы, которую пузырек способен поднять на поверхность жидкости. Приведены зависимости для определения отрывного диаметра пузырька. Показано, что если отрывной диаметр пузырька больше, чем диаметры пузырьков, участвующих в процессе флотации, угол смачивания гидрофобных частиц обеспечивает образование комплексов «пузырек – частица» и характер движения самой динамичной фазы не вызывает увеличение инерционных сил в потоке, то флотационное извлечение гидрофобных частиц возможно при выполнении условия всплытия комплекса  $\rho_1 > \rho_k$ .

Третья глава диссертации посвящена разработке экспериментальной установки и методики экспериментальных исследований процесса флотации вторичных полимеров.

Схема лабораторной установки колонного флотационного аппарата с пневматической аэрацией жидкости для исследования влияния основных параметров процесса на флотационное разделение смеси измельченных пластмасс показана на рисунке 2.

Установка включает емкость 1, которая заполняется водой из линии 1в при помощи вентиля Вн1. Внутри емкости 1, у ее дна, закреплен аэратор 2 для подачи пузырьков воздуха в аппарат. Аэратор устанавливается с возможностью регулировки высоты аэрируемой



1 – емкость; 2 – аэратор; 3 – лопастной дозатор; 4 – питатель; 5, 6 – сепараторы;

Вн1–Вн4 – вентили; Т1 – термометр;

1в – вода на заполнение; 2в – слив воды

**Рисунок 2.** – Схема лабораторной установки колонного флотационного аппарата с пневматической аэрацией

жидкости для определения ее оптимального значения. Расход воздуха, подаваемого из компрессора в емкость 1, регулируется вентилем Вн2 и контролируется ротаметром. Регулировка подачи измельченных пластмасс осуществляется лопастным дозатором 3, в корпусе которого установлен ротор с радиальными лопастями. Подача исходного питания организована через питатель 4 в среднюю часть колонны с возможностью регулирования глубины подачи для исследования ее влияния на процесс флотации. Для самостоятельного оттока образующегося пенного продукта с поверхности жидкости в установке предусмотрена постоянная циркуляция оборотной жидкости. Обратная жидкость подается в колонну через питатель 4, что предотвращает застревание в нем частиц измельченных пластмасс. Для разделения твердой и жидкой фазы пенного продукта используется сепаратор 5, а для осадка – сепаратор 6 при открытии вентиля Вн3. Сепараторы 5 и 6 служат также для накопления буферного объема оборотной жидкости, необходимого для ее постоянной циркуляции с помощью насосов. Жидкость, при необходимости, сливается из установки через линию 2в при помощи вентиля Вн4. Температура жидкости в емкости 1 измеряется термометром Т1.

Выбраны основные исследуемые параметры процесса флотации (температура жидкости в емкости, высота аэрируемой жидкости, глубина подачи материала, концентрация ПАВ, расход воздуха), пределы их варьирования и соответствующие измерительные приборы. А также выбраны основные показатели процесса флотации, по которым оценивалось влияние исследуемых параметров на процесс флотации: извлечение флотируемого компонента – доля флотируемого компонента, попавшего в концентрат,  $\varepsilon$ , %; чистота концентрата – содержание флотируемого компонента в концентрате,  $\beta$ , % (формулы (9)):

$$\varepsilon = \frac{m_{\text{конц}}^{\text{фл}}}{m_{\text{исх}}^{\text{фл}}} \cdot 100\% , \quad \beta = \frac{m_{\text{конц}}^{\text{фл}}}{m_{\text{конц}}} \cdot 100\% , \quad (9)$$

где  $m_{\text{конц}}^{\text{фл}}$  – масса флотируемого компонента в концентрате, кг;

$m_{\text{исх}}^{\text{фл}}$  – масса флотируемого компонента (частиц измельченной гидрофобной пластмассы) в исходной навеске, кг;

$m_{\text{конц}}$  – масса концентрата, кг.

Рассмотрены и проанализированы основные конструкции пневматических аэраторов. Предложена наиболее простая в изготовлении конструкция аэратора, которая способна обеспечить достаточную равномерность распределения пузырьков газа по сечению аппарата.

Для получения выражения, связывающего диаметр отверстия аэратора  $D_{\text{отв}}$  и диаметр пузырька  $d_2$ , образующегося на этом отверстии, рассмотрены различные модели для определения отрывного диаметра пузырька, образующегося на затопленном отверстии, при различных режимах истечения газа из этого отверстия.

Разработана методика инженерного расчета конструктивных и технологических параметров пневматического аэратора. По приведенной методике определено количество отверстий аэратора, их диаметр, шаг спирали, шаг перфорации, необходимая длина трубки и максимальный расход воздуха. По рассчитанным и принятым конструктивным параметрам создана лабораторная установка колонного флотационного аппарата с пневматической аэрацией жидкости для исследования флотационного разделения смеси измельченных пластмасс. Предложена методика и программа экспериментальных исследований, выполняемых на лабораторной модели, выбраны используемые материалы. В качестве ПАВ выбраны сульфанол, синтанол и смесь ПАВ, содержащая лауретсульфат натрия и диэтаноламид. Исследуемые пластмассы были выбраны из широко используемых в быту и промышленности пластмасс с плотностью от 1000 до 1250 кг/м<sup>3</sup>, а именно – акрилонитрилбутадиенстирол (АБС), полиамид (ПА), полистирол (ПС), поскольку их переработка наименее развита. Размер исследуемых частиц выбран в диапазоне 1–4 мм.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований, их анализ, обработка и обобщение. Исследована дисперсность пузырьков, образующихся при аэрации, методом фотографирования их в объеме жидкости и на ее поверхности совместно с масштабной линейкой и последующей компьютерной обработкой. Значение экспериментального среднего диаметра пузырька ( $2,3 \cdot 10^{-3}$  м) было сопоставлено с полученным в главе 3 результатом расчетов размера пузырька газа, образующегося на затопленном отверстии. Сходимость расчетных и экспериментальных данных составила около 95%.

Оценено влияние высоты аэрируемого слоя рабочей жидкости на процесс флотационного разделения измельченных пластмасс. Для этого были получены соответствующие зависимости извлечения ПС от высоты аэрируемого слоя жидкости при концентрации ПАВ, равной  $2,16 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> и  $5,41 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>, показанные на рисунке 3.

Определена достаточная и оптимальная высота слоя аэрируемой жидкости – 0,5–0,6 м, дальнейшее увеличение которой не оказывает сильного влияния на извлечение полимеров.

Получены зависимости основных показателей флотации от концентрации различных типов ПАВ, приведенные на рисунках 4–5.

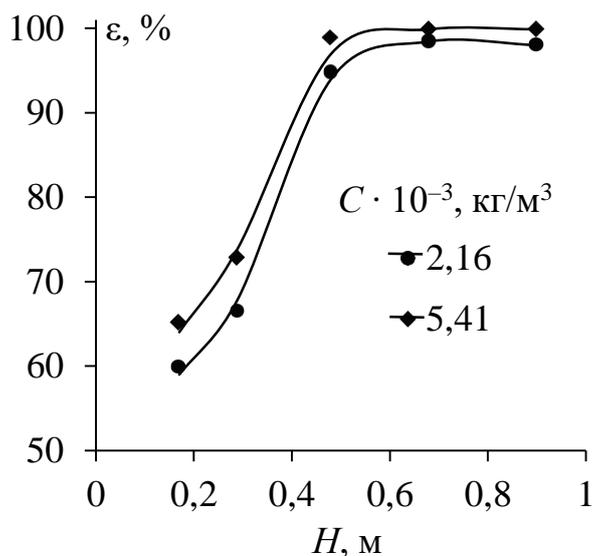


Рисунок 3. – Зависимости извлечения ПС от высоты аэрируемого слоя жидкости при различной концентрации ПАВ

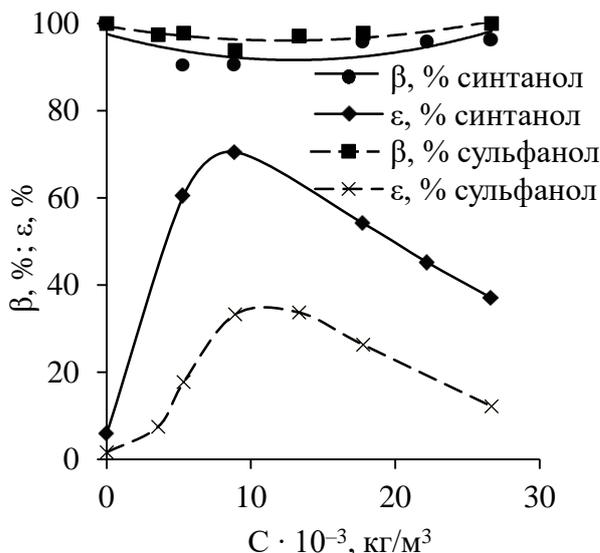


Рисунок 4. – Зависимости чистоты концентрата и извлечения АБС от концентрации стиранола и сульфанола при расходе воздуха  $0,06 \text{ м}^3/\text{мин} \cdot \text{м}^2$

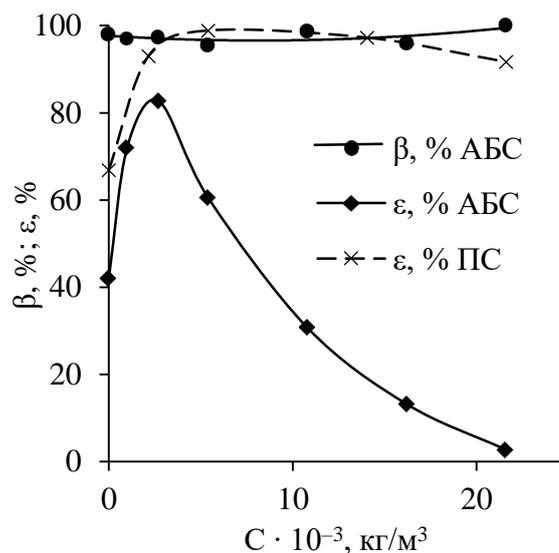


Рисунок 5. – Зависимости чистоты концентрата и извлечения АБС и ПС от концентрации смеси ПАВ при расходе воздуха  $0,11$  и  $0,07 \text{ м}^3/\text{мин} \cdot \text{м}^2$  соответственно

Как видно из рисунков 4–5, извлечение флотируемого компонента  $\varepsilon$  имеет максимум. Это может быть объяснено таким же характером зависимости пенообразующей способности от концентрации ПАВ. Значение концентрации ПАВ, при котором достигается максимальное извлечение флотируемого компонента, зависит от типа полимера и ПАВ.

Получены зависимости влияния расхода воздуха, приведенного к единице площади поперечного сечения колонны,  $G_{\text{пр.в}}, \text{ м}^3/\text{мин} \cdot \text{м}^2$  на процесс флотационного разделения смеси измельченных пластмасс, приведенные на рисунках 6–7.

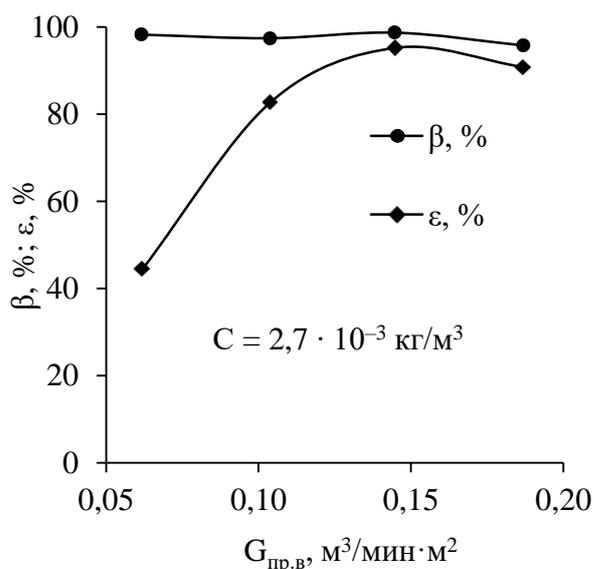


Рисунок 6. – Зависимости чистоты концентрата и извлечения АБС от расхода воздуха при использовании смеси ПАВ

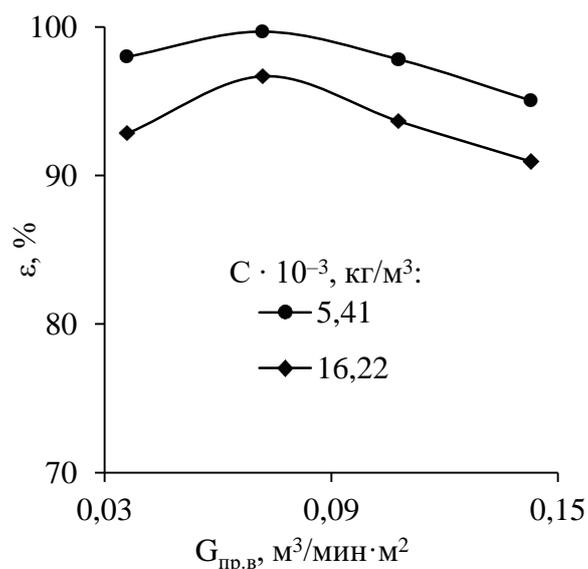
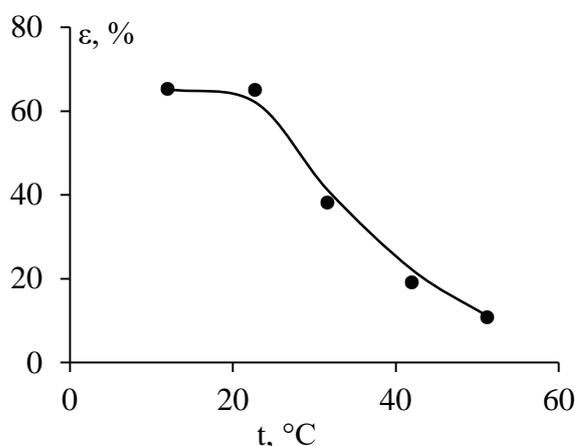


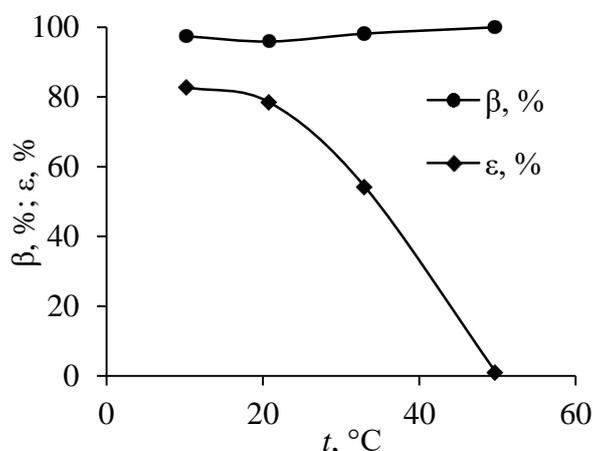
Рисунок 7. – Зависимости извлечения ПС от расхода воздуха при различной концентрации смеси ПАВ

При малых расходах воздуха в жидкости образуется недостаточное количество газовых пузырьков. А при высоких расходах воздуха в жидкости может находиться слишком много пузырьков, часть из которых не будет участвовать в процессе флотации. При этом они могут создавать локальные турбулентные потоки и препятствовать флотации. Значение расхода воздуха, при котором достигается максимальное извлечение флотируемого компонента, зависит от типа полимера. При использовании смеси ПАВ, содержащей лауретсульфат натрия и диэтаноламид, извлечение АБС составляет 95%, а чистота концентрата – 98,7%. А при использовании той же смеси ПАВ при флотации ПС извлечение достигает 99%.

Установлена закономерность влияния температуры рабочей жидкости на процесс флотационного разделения измельченных пластмасс (рисунки 8, 9).



**Рисунок 8.** – Зависимость извлечения ПС от температуры жидкости при высоте аэрируемого слоя жидкости 0,17 м, концентрации смеси ПАВ  $5,41 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> и расходе воздуха 0,072 м<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup>



**Рисунок 9.** – Зависимости чистоты концентрата и извлечения АБС от температуры жидкости при концентрации смеси ПАВ  $2,7 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> и расходе воздуха 0,104 м<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup>

Повышение температуры жидкости выше 20°C приводит к резкому снижению извлечения полимеров при использовании смеси ПАВ, содержащей лауретсульфат натрия и диэтаноламид. Это возможно объясняется тем, что зависимость пенообразующей способности ПАВ от температуры характеризуется кривыми растворимости и для большинства ПАВ они имеют экстремум. Вероятно, повышение температуры раствора приводит к дегидратации молекул ПАВ и к выделению их в виде обособленной макрофазы, что приводит к снижению количества молекул ПАВ, участвующих в процессе флотации.

В пятой главе диссертации рассмотрены вопросы практической реализации результатов исследований. По итогам диссертационной работы был спроектирован, изготовлен и испытан полупромышленный образец флотационного аппарата на ОАО «Белвторполимер». Промышленные испытания подтверждают результаты, полученные при лабораторных исследованиях. Выполнен технико-

экономический анализ и оценена себестоимость разделения материалов в полупромышленной установке, которая составила 24 руб/т. Выявлены основные возможные направления повышения производительности и эффективности флотационного аппарата. Оценены перспективы применения новой конструкции колонного флотационного аппарата и направления дальнейшего развития процесса флотационного разделения полимерных материалов. Внедрение новой конструкции колонного флотационного аппарата при переработке пластмассовых отходов позволит снизить затраты ручного труда на этапе постадийного разделения полимерных материалов. При простом аппаратном оформлении и малых расходах ПАВ и воздуха возможно создание высокопроизводительного и автоматизированного процесса сортировки полимерных отходов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Обоснована приоритетность и показана эффективность механической переработки отходов полимерных материалов с технической, экономической и экологической точки зрения и установлена проблемная область при реализации этого процесса, включающая сортировочные стадии при разделении смесей измельченных вторичных полимеров. Показано, что перспективными процессами разделения пластмасс являются методы их флотационной сортировки на основе различной смачиваемости разделяемых полимеров в присутствии флотореагентов. Предложенный подход обусловлен простотой и надежностью аппаратного обеспечения процесса и позволяет целенаправленно осуществлять разделение пластмасс с близкими или равными плотностями [1, 6, 8–10, 16].

2. Предложен на уровне изобретения [17] способ флотационного разделения смеси измельченных пластмасс путем аэрации рабочего объема флотационного аппарата и изменения гидрофильности или гидрофобности определенного компонента либо компонентов смеси пластмасс с помощью поверхностно-активных веществ. В результате гидрофобные частицы всплывают и отводятся вместе с пеной в верхней части флотационного аппарата в качестве концентрата, а осевшие гидрофильные частицы – в качестве осадка.

3. Установлены основные параметры и определены диапазоны их значений, оказывающие влияние на качество процесса флотации (извлечение флотируемого компонента и чистота концентрата) [4], к которым относятся температура жидкости в емкости (до 20°C), высота аэрируемой жидкости (около 0,5–0,6 м), глубина подачи материала (около 0,05 м), концентрация ПАВ в технологической жидкости (до 10 кг/м<sup>3</sup>), расход воздуха (до 0,2 м<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup>) [2, 3, 5]. При этом обоснованы принятые допущения о незначительном влиянии на процесс флотации парциального давления газа в жидкости и пузырьках, диффузии газа и ПАВ [2, 3, 5, 8].

4. Предложены математические зависимости [4], учитывающие условие сохранения газовыми пузырьками сферической формы, взаимодействие их с окружающей дисперсионной средой и друг с другом, условие всплытия комплекса «пузырек – частица» и соотношение объемов дисперсных фаз в комплексе. Математические зависимости при известных свойствах флотируемого материала позволяют выполнить оценку возможности проведения процесса флотационного разделения смеси измельченных пластмасс в колонном аппарате с пневматической аэрацией и определить конструктивные и технологические параметры аэратора (количество отверстий аэратора, их диаметр, шаг спирали и необходимую длину трубки).

5. Разработана экспериментальная установка [1–3, 10, 11, 13, 14] колонного флотационного аппарата с наиболее простой конструкцией аэратора [4, 15], способной обеспечить достаточную равномерность распределения пузырьков газа по сечению аппарата. Предложена методика и программа экспериментальных исследований, позволяющая изучить влияние исследуемых параметров на показатели процесса флотации.

6. Получены зависимости [1–3, 7, 11–14], показывающие влияние концентрации поверхностно-активных веществ, расхода воздуха, высоты слоя рабочей жидкости и ее температуры на чистоту концентрата и извлечение флотируемого компонента при флотационном разделении смеси измельченных пластмасс с размерами частиц 1–4 мм. Установлено, что оптимальная высота слоя аэрируемой жидкости – 0,5–0,6 м, дальнейшее ее увеличение не оказывает сильного влияния на извлечение полимеров.

На основании анализа полученных зависимостей были выявлены закономерности влияния исследуемых параметров на показатели процесса флотации:

а) чистота концентрата достигает высоких значений (до 99%) в широких диапазонах изменяемых параметров;

б) извлечение флотируемого компонента имеет ярко выраженный максимум в узком диапазоне изменяемых параметров, поэтому для достижения наибольшего извлечения требуется точное соблюдение таких параметров флотации, как концентрация ПАВ, расход воздуха и температура жидкости;

в) повышение температуры жидкости выше 20°C приводит к резкому снижению извлечения полимеров при использовании смеси ПАВ, содержащей лауретсульфат натрия и диэтаноламид;

г) значение концентрации ПАВ, при котором достигается максимальное извлечение флотируемого компонента, зависит от типа полимера и ПАВ;

д) значение расхода воздуха, при котором достигается максимальное извлечение флотируемого компонента, зависит от типа полимера и ПАВ, характер влияния расхода воздуха при различной концентрации ПАВ не изменяется – изменяется лишь извлечение флотируемого компонента.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Промышленные испытания колонного флотационного аппарата для разделения смеси измельченных пластмасс показывает, что он обеспечивает получение продукта разделения с высокой чистотой концентрата и при этом снижаются затраты ручного труда. При промышленном разделении смеси измельченных полиамида и полистирола, полиамида и акрилонитрилбутадиенстирола с размерами частиц 1–4 мм (на ОАО «Белвторполимер») в колонном флотационном аппарате диаметром 0,6 м с пневматической аэрацией получены следующие результаты:

- обеспечивается производительность до 32 кг/ч;
- извлечение флотируемого компонента и чистота концентрата при указанной производительности составляют 97–99%;
- потребление электрической энергии полупромышленной флотационной установкой при переработке 1 т разделяемого материала не превышает 8,5 кВт·ч.

В результате выполнения технико-экономического анализа оценена себестоимость разделения материала в полупромышленной установке, которая составила 24 руб/т.

Реализация результатов исследований перспективна для внедрения на предприятиях, занимающихся вторичной переработкой полимерных материалов (ОАО «Белвторполимер», иностранное предприятие «РеПлас-М», ОАО «Самел», ЗАО «Витебский завод полимерных изделий», ЧП «ЭкоПолитех», ООО «Скар», КПУП «Брестский мусороперерабатывающий завод» и др.), а также в лекционные курсы и лабораторные практикумы в учреждениях высшего образования РБ по дисциплинам «Процессы и аппараты химических технологий» и «Рециклинг полимерных и композиционных материалов».

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**

#### **Статьи, опубликованные в научных изданиях, включенных в Перечень ВАК Республики Беларусь**

1. Опимах, Е. В. Разделение смеси измельченных акрилонитрилбутадиенстирола и полиамида методом флотации с использованием в качестве поверхностно-активных веществ сульфанола и синтанола / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский // Тр. БГТУ. – 2013. – № 3. – С. 179–181.

2. Опимах, Е. В. Разделение смеси полимеров методом флотации / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский // Материалы, технологии, инструменты. – 2013. – Т. 18, № 3. – С. 96–99.

3. Опимах, Е. В. Флотационное извлечение полистирола / Е. В. Опимах // Полимер. материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 75–78.

4. Опимах, Е. В. Расчет пневматического аэратора колонного флотационного аппарата для разделения смеси измельченных пластмасс / Е. В. Опимах // Тр. БГТУ. – 2016. – № 3. – С. 127–135.

### **Материалы конференций**

5. Левданский, А. Э. Разделение смеси измельченных акрилонитрилбутадиенстирола и полиамида методом флотации с использованием в качестве поверхностно-активных веществ сульфанола и синтанола / А. Э. Левданский, Е. В. Опимах, Б. Н. Корганбаев, А. А. Волненко // Развитие науки, образования и культуры независимого Казахстана в условиях глобальных вызовов современности : тр. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Юж.-Казахстан. гос. ун-та / Юж.-Казахстан. гос. ун-т ; редкол.: Ж. И. Мырхалыков (отв. ред.) [и др.]. – Шымкент, 2013. – С. 251–254.

6. Левданский, А. Э. Исследование флотации отходов ПЭТ / А. Э. Левданский, Е. В. Опимах, Н. Т. Сейтханов, Б. А. Кийкбаев // Ауэзовские чтения – 12 : Роль регионального университета в развитии инновационных направлений науки, образования и культуры : тр. междунар. науч.-практ. конф., Шымкент, 1–4 апр. 2014 г. / Юж.-Казахстан. гос. ун-т ; редкол.: Ж. И. Мырхалыков (отв. ред.) [и др.]. – Шымкент, 2014. – Т. 1. – С. 65–68.

7. Опимах, Е. В. Исследование флотации полистирола и полибутилентерефталата / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 нояб. 2014 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. М. Жарский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 154–158.

8. Левданский, А. Э. Флотационное разделение полистирола / А. Э. Левданский, Е. В. Опимах // Сто конкретных шагов. Современное государство для всех – стратегический путь индустриально-инновационного развития страны : тр. междунар. науч.-практ. конф. / Юж.-Казахстан. гос. ун-т ; редкол.: Ж. И. Мырхалыков (отв. ред.) [и др.]. – Шымкент, 2015. – С. 92–98.

### **Тезисы докладов**

9. Опимах Е. В. Разделение смеси полимеров методом флотации / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский // Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб – 2013) : междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 24–27 июня 2013 г. : тез. докл. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: В. Н. Адериша [и др.]. – Гомель, 2013. – С. 63.

10. Опимах, Е. В. Флотационное разделение смеси полимеров / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский // Химическая технология и техника : тез. докл. 77-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 4–9 февр. 2013 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; гл. ред. И. М. Жарский. – Минск, 2013. – С. 34.

11. Опимах, Е. В. Способ флотационного разделения смеси полимеров акрилонитрилбутадиенстирола и полиамида / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : тез. докл. X междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 15–16 окт. 2013 г. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: А. И. Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2013. – С. 59–60.

12. Опимах, Е. В. Исследование флотации отходов ПЭТ [Электронный ресурс] / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский // Химическая технология и техника : тез. докл. 78-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 3–13 февр. 2014 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; гл. ред. И. М. Жарский. – Минск, 2014. – Режим доступа: [http://elib.belstu.by/bitstream/123456789/12381/1/Opimakh\\_42.pdf](http://elib.belstu.by/bitstream/123456789/12381/1/Opimakh_42.pdf). – Дата доступа: 15.02.2017.

13. Опимах, Е. В. Флотирuemость полистирола [Электронный ресурс] / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский // Химическая технология и техника : тез. докл. 79-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 2–6 февр. 2015 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; гл. ред. И. М. Жарский. – Минск, 2015. – Режим доступа: <https://www.belstu.by/Portals/0/userfiles/37/4-NTiT.pdf>. – Дата доступа: 15.02.2017.

14. Опимах, Е. В. Флотационное извлечение полистирола / Е. В. Опимах // Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб – 2015) : междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23–26 июня 2015 г. : тез. докл. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: В. Н. Адериha [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 176.

15. Опимах, Е. В. Моделирование процесса флотации в колонном аппарате с пневматической аэрацией [Электронный ресурс] / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский, Д. И. Чиркун // Химическая технология и техника : тез. докл. 80-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–12 февр. 2016 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; отв. за изд. И. М. Жарский. – Минск, 2016. – Режим доступа: <http://elib.belstu.by/bitstream/123456789/17750/1/modelirovanie-processa-flotacii-v-kolonnom-apparate-s-pnevmaticheskoi-aehraciei-opimakh-e.-v.-levdanskii-a.-eh.-chirkun-d.-i..pdf>. – Дата доступа: 15.02.2017.

16. Опимах, Е. В. Флотационное разделение полимеров [Электронный ресурс] / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский // Химическая технология и техника : тез. докл. 81-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–12 февр. 2017 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; гл. ред. И. В. Войтов. – Минск, 2017. – Режим доступа: [http://elib.belstu.by/bitstream/123456789/21705/1/Opimakh\\_48.pdf](http://elib.belstu.by/bitstream/123456789/21705/1/Opimakh_48.pdf). – Дата доступа: 15.02.2017.

### **Заявка на изобретение**

17. Способ флотационного разделения смеси измельченных пластмасс : заявка ВУ 20150142 / Е. В. Опимах, А. Э. Левданский, Д. И. Чиркун, Д. Г. Калишук, Н. П. Саевич. – Оpubл. 12.03.2015.



## РЭЗІЮМЭ

Апімах Яўгеній Уладзіміравіч

### **Флатацыйны падзел сумесі здробненых другасных палімераў**

**Ключавыя словы:** флатацыя, падзел, павярхоўна-актыўныя рэчывы, пластмасы, адыходы, змочвальнасць.

**Мэта працы:** распрацоўка новага спосабу флатацыйнага падзелу сумесі здробненых пластмас з выкарыстаннем уласцівасці іх выбіральнай змочвальнасці.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** прыменены агульналагічныя метады, тэарэтычны аналіз і абагульненне навуковай літаратуры, эксперымент (лабараторны і прамысловы вопыт), фатаграфаванне, вымярэння, якія ажыццяўляюцца пры дапамозе ратаметраў РМ-ГС/1,6 і РМ-ГС/0,25, вагаў маркі Ohaus RV214, тэрмометра маркі ПІ-002/3.081.2.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацаваны новы флатацыйны спосаб падзелу сумесі здробненых палімерных адходаў, прапанаваны матэматычныя залежнасці для вызначэння канструктыўных параметраў аэратара, распрацавана схема эксперыментальнай устаноўкі калоннага флатацыйнага апарата з пнеўматычнай аэрацыяй вадкасці, атрыманы залежнасці, з дапамогай якіх устаноўлены заканамернасці ўплыву доследных параметраў на паказчыкі працэсу флатацыі. Створаны доследны паўпрамысловы ўзор флатацыйнай устаноўкі для падзелу сумесі здробненых пластмас і праведзены выпрабаванні, якія паказваюць, што калонны флатацыйны апарат з пнеўматычнай аэрацыяй забяспечвае атрыманне прадукту падзелу з досыць высокай чысцінёй канцэнтрату.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** рэалізацыя вынікаў даследаванняў рэкамендавана для ўкаранення на прадпрыемствах, што займаюцца другаснай перапрацоўкай палімерных матэрыялаў, мэтай якіх з'яўляецца пашырэнне спектра перапрацоўваемых тыпаў пластмас і павелічэнне глыбіні перапрацоўкі пластмасавых адходаў.

**Галіна прымянення:** апарат можа знайсці прымяненне пры падзеле пластмасавых адходаў бытавога і прамысловага паходжання, замяніўшы ручное сартаванне, што дазволіць знізіць затраты ручной працы на этапе пастадыйнага падзелу палімерных матэрыялаў.

## РЕЗЮМЕ

Опимах Евгений Владимирович

### **Флотационное разделение смеси измельченных вторичных полимеров**

**Ключевые слова:** флотация, разделение, поверхностно-активные вещества, пластмассы, отходы, смачиваемость.

**Цель работы:** разработка нового способа флотационного разделения смеси измельченных пластмасс с использованием свойства их избирательной смачиваемости.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** применены общелогические методы, теоретический анализ и обобщение научной литературы, эксперимент (лабораторный и промышленный опыт), фотографирование, измерения, осуществляемые при помощи ротаметров РМ-ГС/1,6 и РМ-ГС/0,25, весов марки Ohaus RV214, термометра марки ПИ-002/3.081.2.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработан новый флотационный способ разделения смеси измельченных полимерных отходов, предложены математические зависимости для определения конструктивных параметров аэратора, разработана схема экспериментальной установки колонного флотационного аппарата с пневматической аэрацией жидкости, получены зависимости, с помощью которых установлены закономерности влияния исследуемых параметров на показатели процесса флотации. Создан опытный образец полупромышленной флотационной установки для разделения смеси измельченных пластмасс и проведены испытания, которые показывают, что колонный флотационный аппарат с пневматической аэрацией обеспечивает получение продукта разделения с достаточно высокой чистотой концентрата.

**Рекомендации по использованию:** реализация результатов исследований рекомендована для внедрения на предприятиях, занимающихся вторичной переработкой полимерных материалов, целью которых является расширение спектра перерабатываемых типов пластмасс и увеличения глубины переработки пластмассовых отходов.

**Область применения:** аппарат может найти применение при разделении пластмассовых отходов бытового и промышленного происхождения, заменив ручную сортировку, что позволит снизить затраты ручного труда на этапе поэтапного разделения полимерных материалов.

## SUMMARY

Apimakh Evgeny Vladimirovich

### **Flotation separation of the mixture of shredded secondary polymers**

**Keywords:** flotation, separation, surface-active agent, plastics, waste, wettability.

**The objective of the work:** to develop a new method for flotation separation of the mixture of milled plastics using their selective wettability property.

**Research methods and used equipment:** general logical methods, theoretical analysis and scientific literature generalization, experiment (laboratory and industrial), photography, measurements carried out with RM-GS/1.6 and RM-GS/0.25 rotameters, Ohaus RV214 scales, PI-002/3.081.2 thermometer.

**The obtained results and their novelty.** A new flotation method for separation of the mixture of milled polymeric wastes was developed; mathematical dependencies determining the design parameters of the aerator were proposed; a scheme for the experimental installation of a column flotation apparatus with pneumatic aeration of liquid was developed; and dependencies providing the patterns of influence of the studied parameters on the flotation process were obtained. A prototype of the semi-industrial flotation plant for separating the milled plastic mixture has been created and tests have been carried out showing that the columnar flotation unit with pneumatic aeration provides the separation product with sufficiently high purity of the concentrate.

**Recommendations for use:** the implementation of the research results is recommended for implementation in polymer recycling facilities at the enterprises, whose purpose is to expand the spectrum of processed types of plastics and to increase the depth of plastic waste processing.

**Field of application:** the device can be used in the separation of plastic wastes of domestic and industrial origin, replacing manual sorting, which will reduce the cost of manual labor during the stage of stepwise separation of polymer materials.

Научное издание

**Опимах Евгений Владимирович**

**ФЛОТАЦИОННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СМЕСИ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ  
ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.17.08 – процессы и аппараты химических технологий

Ответственный за выпуск Е. В. Опимах

Подписано в печать 22.08.2017. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 60 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое оформление:

учреждение образования

«Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,

изготовителя, распространителя печатных изданий.

№ 1/227 от 20.03.2014.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.