



**Процессы** переработки кофейного шлама  
[Текст] : монография / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, Н. В. Ружицкая, Т. Л. Макиевская. - Киев : ЭнтерПринт, 2014. - 228 с. : табл., рис. - Библиогр.: с. 213-223. - ISBN 978-966-7857-22-6.

Книга содержит информацию по вопросам утилизации кофейного шлама. Обоснована коммерческая целесообразность переработки шлама. Анализируются механизмы бародиффузионного массопереноса, их эффективность при дополнительном извлечении растворимых веществ, получения разновидностей масел кофе, топливных элементов из шлама при использовании принципов нанотехнологий.

Представлены результаты испытаний тепломассообменной аппаратуры.

Книга предназначена для студентов, научных сотрудников и проектировщиков технологического оборудования, занимающихся проблемами экоиндустрии АПК.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Потребительский спрос на пищевые концентраты постоянно повышается. Среди продукции пищевых концентратных технологий значительный объем занимает растворимый кофе. Наиболее динамично интерес к растворимому кофе растет в Украине. Выпуск этого продукта постоянно увеличивается, однако обостряются и проблемы, которые характерны для его производства. Во-первых, выпуск порошка растворимого кофе требует дорогого импортного сырья, территории, культивирования которого далеки от Украины. Доставка такого сырья требует затрат, что ощутимо влияет на экономическую составляющую, на себестоимость продукции. Во-вторых, в настоящее время в Украине в технологии используется только треть от купленного сырья, остальное - это отходы (кофейный шлам). В-третьих, кофейный шлам является активным загрязнителем литосферы. Если учесть, что речь идет о тоннажных производствах, то проблема захоронения кофейного шлама тоже отражается на экономике производства. С ужесточением регламентаций по экологической безопасности производства острота вопросов утилизации шлама будет только повышаться. В-четвертых, технология растворимого кофе требует концентрирования экстракта более, чем в 2 раза, т.е. удаления из него более половины воды. Известно, что процессы обезвоживания являются чрезвычайно энергозатратными, это также повышает себестоимость

продукции. Высокотемпературные процессы экстрагирования и сушки экстракта приводят к серьезным потерям вкусовых компонентов исходного сырья. Таким образом, энергия, экология и качество продукта являются ключевыми при поиске путей совершенствования технологии растворимого кофе.

Авторы монографии в течение последних 20 лет занимались разнообразными проблемами совершенствования пищевых технологий на основе адресной доставки энергии с помощью систем на низкотемпературных тепловых трубах. Были разработаны, изготовлены и внедрены в производство термосифонные утилизаторы тепловой энергии [1]. Мониторинг пищевых производств показал, что потери продукта в пылевых выбросах сушильного и печного оборудования оказываются в материальном плане более существенными, чем потери тепловой энергии. В процессе сушки с уходящим теплоносителем за год в атмосферу выбрасывается с одной установки до 4т порошка кофе. Используя возможности тепловых труб, авторы предложили принципиально новый аппарат - тепломассоутилизатор [2]. Испытания, которые проведены на пищевых концентратных и сахарных производствах, подтвердили гипотезу авторов, что термосифонный аппарат может эффективно работать в режиме самоочищения от пыли теплопередающей поверхности. А это пыль дорогого пищевого продукта. Пылевые отложения в аппарате постоянно смываются в режиме парциальной конденсации водяных паров из отработавшего сушильного агента. Тепломассоутилизатор выполняет функции скруббера и утилизатора теплоты, в комплексе решает проблемы экологии, энергоэффективности и возвращает в технологию продукт, который раньше терялся и загрязнял окружающую среду.

Следующим объектом исследований авторов стал кофейный шлам, структура которого уникальна. Переработка его целесообразна и имеет коммерческие перспективы. В настоящей монографии показано, как на основе современных достижений в теории и технике тепломассопереноса обеспечить полное извлечение всех целевых компонентов из шлама. Сформулировано ряд гипотез по организации процессов массопереноса. Так, в основе инновационных технологий экстрагирования используется концепция адресной доставки энергии к полярным молекулам пищевой системы, инициирования бародиффузионного потока из капиллярной структуры сырья. Это на порядки снижает внутреннее диффузионное сопротивление, что интенсифицирует процесс массопереноса, позволяет в большей степени извлекать целевые компоненты, сократить время процесса и снизить его энергоемкость [3].

Научно-техническая гипотеза обезвоживания изменяет традиционные задачи, которые ставились перед воздухом (теплоносителем). Предложено ограничиться для воздуха задачами диффузионной и транспортной среды. Принципы направленного потока энергии (преимущественно от электромагнитных источников) существенно сократили расходы воздуха, потери энергии с его выбросами и повысили эффективность использования энергии. Все гипотезы доказаны в ходе комплексных экспериментальных исследований и производственных испытаний.

В монографии последовательно рассмотрены процессы переработки кофейного шлама. Анализируются традиционные и предлагаются новые подходы к объяснению и моделированию процессов в условиях импульсных электромагнитных полей. На первом этапе рассматриваются вопросы теории и техники глубокого извлечения из шлама растворимых водой веществ. Показана как возможность простой реализации идей авторов, так и ее коммерческая целесообразность. Установлено, что полученный продукт не только позволяет на 10-15% повысить выход экстрактивных веществ из зерен кофе, но и не уступает от традиционного экстракта кофе по качественным показателям.

На втором этапе предлагается выделить из шлама масло. Здесь рассматриваются последовательно процессы сушки шлама в ИК-поле и экстрагирования. Показано как получить рафинированное масло кофе и ароматизированное - кофеоль.

На третьем этапе исследуются процессы переработки оставшейся твердой фракции. Моделируются процессы баротермической активации шлама, которые позволяют разрушить оболочку клетки и выделить ее содержимое.

Настоящая монография посвящена проблемам описания процессов в аппаратах с электромагнитными интенсификаторами. Рассмотрено большинство специфичных для таких аппаратов типовых задач: «ЭМП - слой и поток дисперсного материала» при сушке и экстрагировании различными растворителями (водой, этанолом, гексаном, нефрасом). Серьезное внимание уделено постановке и решению системных задач: методам оптимизации аппаратов с электромагнитными интенсификаторами. Таким образом, представлены научно - технические основы тепломассообменных аппаратов с электромагнитными генераторами энергии. В монографии представлены результаты кандидатских диссертаций Н.В. Ружицкой [4] (научный руководитель С.Г. Терзиев) и Т.Л. Макиевской [5] (научный руководитель О.Г. Бурдо).

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИИ</b>	
<b>РАСТВОРИМОГО КОФЕ .....</b>	<b>8</b>
1.1. Тенденции рынка кофе.....	8
1.2. Характеристика сырья и готового продукта.....	10
1.3. Основные этапы технологии растворимого кофе .....	14
1.4. Эффективность использования сырьевых ресурсов .....	16
1.5. Проблемы современных технологий производства растворимого кофе.....	16

1.6.	Коммерческая привлекательность кофейного шлама.....	18
1.7.	Технологии переработки кофейного шлама .....	21
<b>Глава 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ТЕХНИКИ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ .....</b>		<b>26</b>
2.1.	Специфика экстрагирования водорастворимых веществ из зерен кофе.....	26
2.2.	Механизм извлечения водорастворимых веществ из сырья растительного происхождения и методы интенсификации процесса экстрагирования.....	32
2.3.	Методы моделирования процесса экстрагирования из зерен кофе...	38
2.4.	Использования микроволновых технологий в пищевой промышленности.....	45
2.5.	Предлагаемые принципиальные схемы экстрагирования на основе микроволновых технологий .....	48
2.5.1.	<i>Классификация аппаратов для экстрагирования .....</i>	<i>48</i>
2.5.2.	<i>Принципиальные схемы МВ-экстракторов .....</i>	<i>50</i>
2.5.3.	<i>Принципиальные схема МВ-экстракторов, разработанных в ОНАПТ .....</i>	<i>52</i>
<b>Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «СЫРЬЕ - ЭКСТРАГЕНТ» В УСЛОВИИ ИСПУЛЬСНО-ВОЛНОВОГО ПОДВОДА ЭНЕРГИИ .....</b>		<b>55</b>
3.1.	Методы аналитического моделирования.....	55
3.1.1.	<i>Движущая сила массопереноса и фазовые равновесия при экстрагировании из кофейного сырья.....</i>	<i>56</i>
3.1.2.	<i>Механизм диффузионного взаимодействия в микроволновом поле .....</i>	<i>57</i>
3.1.3.	<i>Аналитическое решение внутренней задачи массопереноса при экстрагировании в микроволновом поле .....</i>	<i>62</i>
3.1.3.1.	<i>Модель массопереноса из пористого тела сферической формы .....</i>	<i>62</i>
3.1.3.2.	<i>Модель диффузии внутри капилляра пористого тела .....</i>	<i>63</i>
3.1.3.3.	<i>Модель диффузии из точечного источника в поток.....</i>	<i>64</i>
3.1.3.4.	<i>Модель массопереноса вещества из твердой фазы в ядро потока экстрагента .....</i>	<i>66</i>
3.2.	Методы экспериментального моделирования.....	71
3.2.1.	<i>Методика определения концентрации экстрактивных веществ в модельной среде.....</i>	<i>71</i>
3.2.2.	<i>Методика определения влажности кофейного шлама .....</i>	<i>73</i>
3.2.3.	<i>Методика определения предельной концентрации экстрактивных веществ в твердой фазе.....</i>	<i>73</i>
3.2.4.	<i>Методика определения свойств кофейного раствора .....</i>	<i>74</i>
3.2.5.	<i>Методика определения коэффициента массоотдачи .....</i>	<i>75</i>
3.2.6.	<i>Методика определения площади поверхности контакта фаз..</i>	<i>76</i>
3.2.7.	<i>Методика обобщения результатов экспериментов .....</i>	<i>76</i>
3.2.8.	<i>Оценка погрешностей измерений .....</i>	<i>78</i>

<b>Глава 4. ПРОЦЕССЫ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «КОФЕЙНЫЙ ШЛАМ - ВОДА» В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ .....</b>	<b>79</b>
4.1. Задачи и общая характеристика экспериментов .....	79
4.2. Определения предельной концентрации экстрактивных веществ в кофейном шламе .....	82
4.3. Исследования гидравлики в массообменном модуле экстрактора...	83
4.4. Влияние режимных параметров на интенсивность массопереноса...	89
4.4.1. <i>Влияние температуры и интенсивности энергоподвода .....</i>	<i>90</i>
4.4.2. <i>Влияние высоты обрабатываемого слоя продукта .....</i>	<i>91</i>
4.4.3. <i>Влияние скорости потока экстрагентов .....</i>	<i>92</i>
4.5. Обобщение результатов экспериментов .....	94
4.6. Анализ результатов экспериментального моделирования .....	99
<b>Глава 5. ПРОЦЕССЫ СУШКИ КОФЕЙНОГО ШЛАМА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ .....</b>	<b>101</b>
5.1 Интенсификация процессов сушки при переработке растительного сырья .....	101
5.1.1 <i>Исходные предпосылки .....</i>	<i>101</i>
5.1.2. <i>Характеристика сушильного оборудования отрасли .....</i>	<i>102</i>
5.1.3. <i>Методы интенсификации процесса сушки .....</i>	<i>103</i>
5.2. Кинетика инфракрасной сушки кофейного шлама в неподвижном слое .....	106
5.2.1. <i>Схема экспериментального стенда .....</i>	<i>106</i>
5.2.2. <i>Влияние мощности излучения на кинетику сушки .....</i>	<i>108</i>
5.2.3. <i>Влияние удельной загрузки продукта .....</i>	<i>109</i>
5.2.4. <i>Влияние расстояния поверхности слоя от ИК-излучателей....</i>	<i>111</i>
5.2.5. <i>Влияние скорости движения воздуха в камере .....</i>	<i>113</i>
5.3. Испытание образца ИК-сушилki для кофейного шлама.....	115
5.3.1. <i>Конструкция ИК-сушилki .....</i>	<i>115</i>
5.3.2. <i>Влияние мощности ИК-генераторов .....</i>	<i>116</i>
5.3.3. <i>Влияние скорости движения ленты .....</i>	<i>117</i>
5.3.4. <i>Влияние количества ИК-модулей .....</i>	<i>117</i>
5.3.5. <i>Влияние удельной загрузки .....</i>	<i>118</i>
5.4. Энергетика ленточной ИК-сушилki .....	119
<b>Глава 6. ПРОЦЕССЫ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ МАСЛА КОФЕЙНОГО ШЛАМА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ.....</b>	<b>122</b>
6.1. Исследования условий фазовых равновесий при экстрагировании кофейного шлама.....	122
6.1.1. <i>Задачи и общая характеристика экспериментов .....</i>	<i>122</i>
6.1.2. <i>Определение коэффициентов диффузии .....</i>	<i>123</i>
6.1.3. <i>Предельные концентрации кофейного масла в шламе и в экстрагентах .....</i>	<i>124</i>
6.2. Исследование кинетики периодических процессов экстрагирования.....	126
6.2.1. <i>Задачи и общая характеристика экспериментов .....</i>	<i>126</i>
6.2.2. <i>Влияние температуры экстрагента .....</i>	<i>127</i>

6.2.3. Влияние характера подвода энергии .....	130
6.2.4. Влияние соотношения твердой фазы и экстрагентах .....	131
6.2.5. Влияние характера растворителя .....	133
6.3. Обработка результатов экспериментов .....	134
6.4. Обобщение результатов экспериментов .....	137
<b>Глава 7. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ МИКРОВОЛНОВЫХ ЭКСТРАКТОРОВ .....</b>	<b>142</b>
7.1. Исходные предпосылки .....	142
7.2. Структура расчета микроволнового экстрактора .....	144
7.2.1. Обобщенная схема расчета аппарата .....	144
7.2.2. Структура расчета теплофизических характеристик раствора .....	146
7.2.3. Структура расчета условий фазовых равновесий .....	146
7.2.4. Структура расчета гидродинамических характеристик аппарата .....	147
7.2.5. Особенности расчета материальных и энергетических балансов экстрактора .....	148
7.2.6. Структура расчета кинетики массопереноса .....	149
7.2.7. Порядок расчета концентрационных полей в экстракторе .....	150
7.3. Алгоритм расчета микроволнового экстрактора системы «вода - кофейное сырье» .....	151
7.4. Инженерная методика расчета микроволнового экстрактора кофейного масла .....	153
7.4.1. Структура расчета теплофизических свойств экстрагентов .....	153
7.4.2. Структура расчета текущей концентрации масла в твердой фазе .....	155
7.4.3. Структура расчета кинетики массопереноса .....	155
7.5. Алгоритм расчета микроволнового экстрактора для извлечения масла и кофе .....	157
<b>Глава 8. ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ЭКСТРАКТОВ .....</b>	<b>160</b>
8.1. Исходные предпосылки .....	160
8.2. Компьютерный эксперимент .....	161
8.3. Оптимизация МВ-экстрактора .....	167
8.3.1. Задачи оптимизации .....	167
8.3.2. Выбор параметров оптимизации МВ экстрактора и методы решения задачи .....	170
8.3.3. Анализ влияния параметров на технико-экономические показатели .....	172
8.3.4. Результаты оптимизации .....	176
<b>Глава 9. ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДОЙ ФРАКЦИИ КОФЕЙНОГО ШЛАМА .....</b>	<b>178</b>
9.1. Экологический мониторинг производства растворимого кофе .....	178
9.2. Пути утилизации кофейного шлама .....	179
9.3. Математическое моделирование процессов активации кофейного	

шлама .....	180
9.4. Фазовые равновесия тройной системы.....	188
9.5. Физико-химические методы активации кофейного шлама .....	191
9.6. Характеристика агропеллет, полученных из кофейного шлама .....	191
<b>Глава 10. ИННОВАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ КОФЕЙНОГО ШЛАМА.....</b>	<b>196</b>
10.1. Описание экспериментального образца микроволнового экстрактора для извлечения водорастворимых компонентов .....	196
10.2. Стендовые испытания энергетической системы МВ-экстрактора.....	199
10.3. Испытание МВ-экстрактора в условиях производства .....	203
10.4. Дегустационные исследования кофейного экстракта .....	206
10.5. Многофункциональный экстрактор с микроволновым интенсификатором .....	207
10.5.1. Принципиальная схема экстрактора масла кофе .....	207
10.5.2. Испытания экстрактора масла кофе .....	208
10.5.3. Характеристика образцов масел кофе.....	210
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>211</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>213</b>