

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

на правах рукописи



ЧИБИРЕВ Олег Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА БРИКЕТИРОВАНИЯ
ОТХОДОВ ЛЕСОПЕРЕРАБОТКИ
НА ГИДРАВЛИЧЕСКОМ ПРЕССОВОМ ОБОРУДОВАНИИ**

05.21.01 – «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., доц. Куницкая О.А.

Воронеж

2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	9
1.1. Топливные брикеты из отходов лесопереработки.....	9
1.2. Современное прессовое оборудование для брикетирования	14
1.3. Анализ научных сведений по тематике исследования.....	21
1.3.1. Экспериментальные сведения о прочности и плотности брикетов из измельченной древесины	21
1.3.2. Теоретические сведения о прессовании измельченных древесных материалов	29
1.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ	33
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕССОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ	35
2.1. Деформативные свойства конгломерата частиц древесины	35
2.1.1. Упругие и прочностные свойства древесины	36
2.1.2. Упругие свойства конгломерата древесных частиц.....	47
2.2. Теоретическая оценка потребного давления прессования в зависимости от плотности брикета.....	56
2.3. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ	59
3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	61
3.1. Материалы и аппаратура, методика и план эксперимента	61
3.2. Методика обработки экспериментальных данных	71
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	76

4.1. Результаты экспериментов по определению плотности и прочности брикетов	76
4.2. Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований	87
4.3. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ	90
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	92
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	95
ПРИЛОЖЕНИЯ К РАБОТЕ	107
Приложение I. Развёрнутые выражения для коэффициентов матрицы податливости и упругости древесины при смене системы координат.....	108
Приложение II. Результаты экспериментальных исследований плотности брикетов	118
Приложение III. Результаты экспериментальных исследований прочности брикетов	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В современных условиях увеличение доли использования возобновляемых источников энергии становится все более важным для общества [29], [40] – [42], [77], [80], [85], [90], [94]. Развивается рынок древесных пеллет и брикетов [6], [7], [9], [16], [17], [18], [25], [26], [32], [39], [53], [58], [96] - [104] – экологически чистого биотоплива. Получают распространение технологии производства топлива из отходов сельскохозяйственной и других отраслей промышленности [10], [22], [71], [73] - [79], [88]. Помимо эколого-энергетических аспектов важно то, что вовлечение отходов в переработку повышает общую культуру производства [11], [31], [43], [44], [52], [60].

Основной операцией при производстве брикетов является прессование [17], [45], [46], [82] – [84], [87]. Исследованием напряженно-деформированного состояния древесных материалов под воздействием различных нагрузок занимались отечественные ученые Е.К. Ашкенази, В.А. Баженов, С.М. Базаров, Ф.П. Белянкин, Б.М. Буглай, В.Н. Быковский, Н.А. Модин, В.И. Огарков, В.И. Пятакин, В.А. Шамаев, П.Н. Хухрянский, В.Ф. Яценко и другие. Исследованиям в области прессования древесной массы при пеллетировании посвящены работы В.К. Любова, В.И. Мелехова, О.Д. Мюллера и других.

Из фундаментальных работ в области непосредственно брикетирования следует отметить монографию Н.А. Модина [45] года, при этом современных работ по указанной тематике известно сравнительно мало. Очевидно, что промышленность за это время сделала шаг вперед, появились новые модели высокопроизводительных прессов, главным образом – гидравлических, кроме того, изменились и социально-экономические условия [62].

Таким образом, считаем, что дальнейшие исследования в области брикетирования отходов лесопереработки являются актуальными как для теории, так и для практики лесозаготовительного производства.

Степень разработанности темы исследования. Известны математические модели, описывающие формирование пеллет из опилок в фильерах открытого типа; для этого случая проработаны вопросы оценки деформативных свойств прессуемой древесной массы [47] – [51], [57], [61]. Известны результаты теоретических и экспериментальных исследований по виброударному уплотнению измельченной коры и опилок [27], [28], [34], [35], [37]. Опубликованы результаты ряда экспериментальных исследований по брикетированию опилок и коры с использованием штемпельных прессов с открытой матрицей [45]. Научное описание вопросов уплотнения измельченных древесных материалов в закрытых матрицах гидравлических прессов не сформировано.

Цель работы – совершенствование процесса производства брикетов с использованием гидравлических прессов на базе дальнейших исследований уплотнения измельченных древесных материалов.

Задачи исследования:

1. Провести теоретические исследования деформативных свойств конгломерата древесных частиц и оценить значения модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона прессуемого сырья.
2. Разработать уточненную математическую модель процесса прессования древесных частиц в закрытой матрице и определить значения ее параметров в зависимости от свойств сырья и конечной плотности брикета.
3. Провести экспериментальные исследования плотности брикетов, получаемых на гидравлическом прессе, с учётом влажности и средней крупности материала, процентного содержания измельченной коры в экспериментальном материале, давления прессования.

4. Провести экспериментальные исследования прочности брикетов, получаемых на гидравлическом прессе, с учётом влажности и средней крупности материала, процентного содержания измельченной коры в экспериментальном материале, давления прессования.

Научная новизна: разработанные и исследованные математические модели прессования древесной массы с использованием гидравлического прессового оборудования, уточняющие представления о деформативных свойствах измельченной древесины и коры и развивающие теорию уплотнения древесных материалов, позволяющие обосновать рациональные параметры процесса брикетирования в закрытой матрице с учётом свойств сырья и требований к конечной продукции.

Теоретическая значимость работы. По результатам выполненных исследований

1. получены оценки модуля деформации, модуля сдвига и коэффициента Пуассона конгломерата хаотически ориентированных древесных частиц;
2. представлены зависимости, учитывающие влияние плотности конгломерата на его деформативные свойства;
3. уточнена математическая модель прессования древесных частиц в закрытой матрице и определены значения ее параметров в зависимости от свойств сырья и конечной плотности брикета.

Практическая значимость работы:

Результаты исследования позволяют обосновать рациональные параметры процесса брикетирования, повысить прочность и качество брикетов за счет обоснованного подбора параметров процесса брикетирования с учетом влияния влажности и средней крупности материала, процентного содержания измельченной коры в прессуемом материале, давления прессования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты теоретической оценки модуля деформации, сдвига и коэффициент Пуассона прессуемого конгломерата древесных частиц при варьировании его плотности.
2. Результаты экспериментальных исследований, устанавливающие влияние свойств древесной массы, прессуемой в закрытой матрице гидравлического пресса, на прочность и плотность получаемого брикета.

Методология и методы исследования. На стадии анализа состояния вопроса использованы методы сбора и анализа информации. При проведении теоретических исследований применялись методы механики анизотропного тела, теории вероятности, интегрального и дифференциального исчисления. На стадии эксперимента применялись методы оптимального планирования многофакторного эксперимента, при обработке опытных данных использовались методы статистической обработки данных.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается тем, что теоретические исследования базируются на общепринятых и проверяемых положениях механики; проведением экспериментальных исследований на промышленном гидравлическом прессе; удовлетворительным согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований; в известных случаях – удовлетворительным согласованием результатов исследования с опубликованными сведениями независимых источников; применением лицензионного программного обеспечения и современных вычислительных средств при проведении всех этапов исследования.

Апробация результатов проводилась на международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» (Вологда, 2015, 2016 г.), научно-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование» (Санкт-Петербург, 2016), международной

научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (Воронеж, 2015, 2016 г.). Основное содержание работы опубликовано в 2 статьях из перечня журналов, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертационных исследований, общее число публикаций по теме работы составляет 9.

Работа выполнена в соответствии с хозяйственной темой ФГБОУ ВО ВГЛТУ «Исследования перспективных направлений заготовки и переработки древесины», регистрационный номер № 3/8.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» (ФГБОУ ВО ЯГСХА, руководитель школы – проф. И.В. Григорьев).

Сведения о структуре работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав текста, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка (включает 105 наименований), трёх приложений. Основной текст работы изложен на 106 страницах, содержит 31 рисунок, 25 таблиц. Общий объем тома с приложениями составляет 121 страницу, включая 31 рисунок и 27 таблиц.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Топливные брикеты из отходов лесопереработки

Брикеты представляют собой плотные куски, полученные из сыпучей древесины либо, реже, измельченной коры, путем её прессования. В настоящее время распространены технологии брикетирования без применения искусственных связующих веществ, так как при этом получается экологически чистый брикет [72], [81], [86], [89], [91] – [93] – в качестве естественного связующего при брикетировании выступает лигнин, выделяющийся из клеток древесины под действием давления и температуры [17], [19].

Технологические процессы брикетированию могут включать в себя следующие основные операции [17], [45]:

- транспортировку сырья к брикетной установке;
- измельчение крупных древесных отходов;
- сепарацию (сортировку по крупности);
- сушку;
- термообработку;
- прессование (формирование брикета);
- хранение и транспортировку к месту потребления.

Перечисленные выше операции применяются не во всех технологических процессах брикетирования.

К топливным брикетам предъявляются определенные требования, регламентированные стандартами. Например, в таблице 1.1 представлены технические требования к топливным брикетам, разработанные в России.

Таблица 1.1 – Технические требования к топливным брикетам [17]

Показатель	Нормы для сортов		
	Высший сорт	I сорт	II сорт
Влажность, не более, %	5	5-10	10-18
Зольность, не более, %	5	5	5
Низшая удельная теплота сгорания, МДж/кг	16,7-23	14,6-16,7	13,8-14,6
Плотность, не менее, кг/м ³	950	950	950
Массовая доля мелочи (куски размером менее 25 мм), не более, %	5	5	5
Длина, мм	80-400		
Диаметр, мм	40-90		

В различных странах были в разное время введены различные стандарты, например [95], [98], [99], [101]:

- США - Standard Regulations & Standards for Pellets in the US: The PFI;
- Великобритания - The British BioGen Code of Practice for biofuel;
- Швейцария - SN 166000;
- Швеция - SS 187120;
- Австрия - ONORM M 7135;
- Германия DIN 51731 и DIN plus.

В 2011 году введены новые стандарты качества биотоплива [19]. Сведения из стандарта приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Требования к топливным брикетам по стандарту [19]

Показатель	Единица измерения	Класс брикета		
		А		В
		1	2	
Сырьё	-	Стволовая древесина и её отходы, не подвергавшиеся химической обработке	Вся биомасса дерева за исключением корней; стволовая древесина; лесосечные отходы; кора; отходы лесопереработки, не подвергавшиеся химической обработке	Плантационная древесина; отходы лесопереработки без ограничений; древесный утиль
Размеры (длина x ширина x высота)	мм			
Влажность	%	< 12	< 15	<15
Золность	%	< 0,7	< 1,5	< 3,0
Плотность	г/см ³	> 1	> 1	> 0,9
Теплотворная способность	МДж/кг	> 15,5	> 15,3	> 14,9

Показатель	Единица измерения	Класс брикета		
		А		В
		1	2	
Максимальное содержание примесей:				
Азот	%	0,3	0,5	1
Сера	%	0,05	0,05	0,05
Хлор	%	0,02	0,02	0,03
Мышьяк	мг/кг	1	1	1
Кадмий	мг/кг	0,5	0,5	0,5
Хром	мг/кг	10	10	10
Медь	мг/кг	10	10	10
Свинец	мг/кг	10	10	10
Ртуть	мг/кг	0,1	0,1	0,1
Никель	мг/кг	10	10	10
Цинк	мг/кг	100	100	100

Резюмируя сведения таблицы 1.2, отметим, что топливные брикеты должны иметь плотность свыше 1 г/см³, влажность до 15 % и зольность в пределах 0,7 – 3 %, допускается содержание в брикетах коры.

Низшую теплоту сгорания оценим по формуле Д.И. Менделеева [1], [15]:

$$Q_H = 339C + 1031H - 109O - 25W \quad (1.1)$$

где C – процентное содержание углерода в коре по массе, H – процентное содержание водорода, O – процентное содержание кислорода, W – относительная влажность материала брикета.

По формуле (1.1) при $C = 42 \%$, $H = 8 \%$, $O = 50 \%$ получим график, представленный на рисунке 1.1.

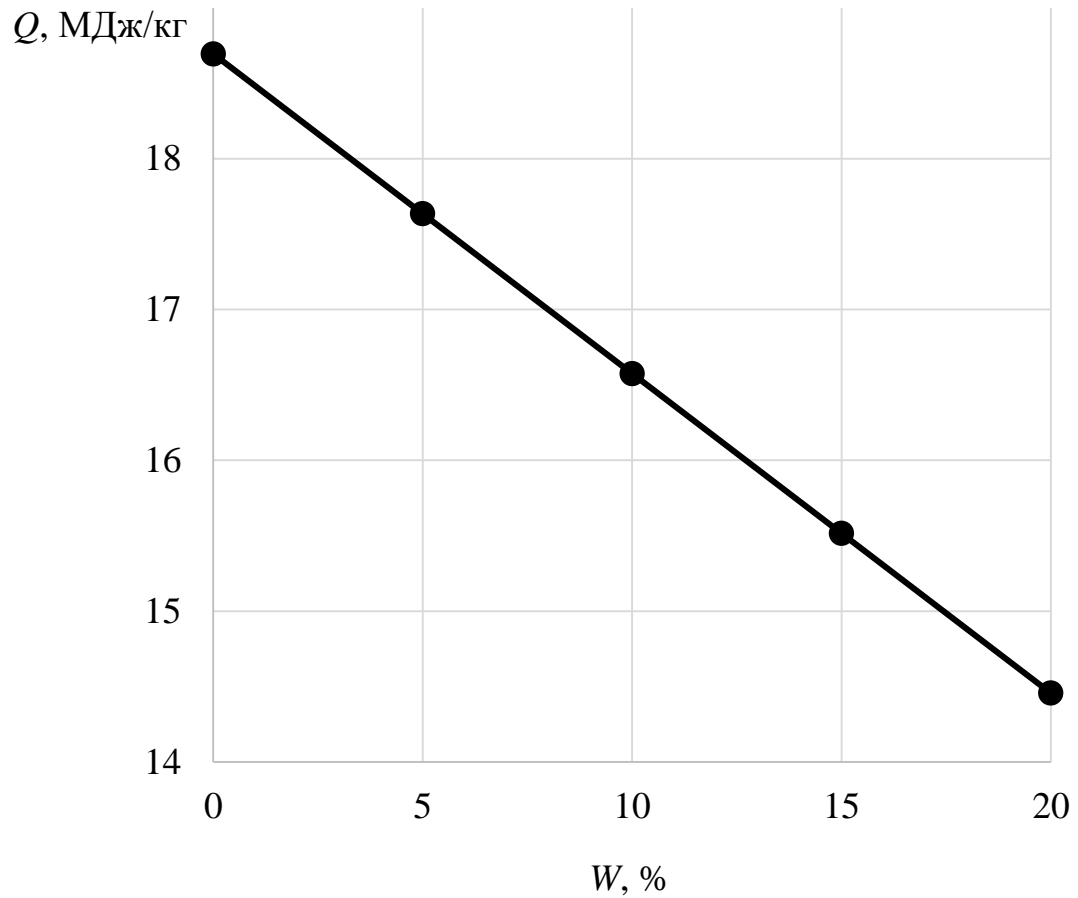


Рисунок 1.1 – Рабочая теплотворная способность древесины в зависимости от относительной влажности

График показывает, что при влажности ниже 15 % требование к минимальной теплотворной способности брикетов выполняется автоматически [64].

1.2. Современное прессовое оборудование для брикетирования

Основным оборудованием, определяющим производительность участка по производству брикетов, являются прессы. Известны прессы для брикетирования древесных отходов следующих конструкций [17], [45]:

- штемпельные с открытой матрицей;
- копровые;
- шнековые;
- гидравлические;
- ротационные;
- ударно-механические.

Копровые и ротационные прессы не получили распространения.

В таблице 1.3 кратко изложены сведения о преимуществах и недостатках распространенных типов прессов для брикетирования [7], [39], [45].

Таблица 1.3 – Преимущества и недостатки различных конструкций прессов [7], [39], [45]

Тип пресса	Недостатки	Достоинства
Шнековый	Высокое потребление электроэнергии Износ подающего шнека Необходимость постоянного регулирования шнекового зазора во время работы пресса Необходимость охлаждения брикетов после прессования и нагрева Требуется высококвалифицированный персонал для обслуживания пресса	Привлекательный вид изготовленных брикетов Высокая плотность брикетов Брикеты влагуустойчивы

Тип пресса	Недостатки	Достоинства
Гидравлический	Сравнительно высокие капитальные затраты на организацию производства	Высокая надежность в сравнении со шнековыми прессами; Отсутствие необходимости менять шнек или выполнять наплавку на него Низкое потребление электроэнергии Отсутствие необходимости охлаждать брикеты Отсутствие необходимости устанавливать системы дымоудаления Возможность мгновенного запуска оборудования Высокая пожаробезопасность Возможность брикетирования сырья широкого диапазона фракций
Ударно-механический	Возможность брикетировать только однородное сырьё Сырьё для брикетирования должно быть влажностью 12-14 %	Высокая производительность (до 3000 кг/час)
Штемпельный с открытой матрицей	Ограничение конечной плотности получаемых брикетов из-за незначительной величины подпора прессуемой массы в коротких открытых матрицах Возможность брикетировать только однородное сырьё	Низкая стоимость пресса

Можно считать гидравлические прессы наиболее надёжными и безопасными для оборудования современных высокопроизводительных брикетных станций [39].

Операция брикетирования на гидравлических прессах осуществляется следующим образом (схема представлена на рисунке 1.2). Загрузочный шнек (2) подает материал, находящийся в бункере (1), в наполнитель, продолжительность работы загрузочного шнека взаимосвязана с системой автоматического дозирования материала. После окончания загрузки наполнителя и остановки загрузочного шнека, поршень наполнителя (3) производит предварительное сжатие материала, находящегося в камере наполнителя (4). Главный прессующий поршень (6) передвигает предварительно сжатый материал в одну из двух камер пресс-

формы (5) и сжимает материал в плотный брикет. В течение этого этапа выталкиватели, установленные параллельно главному цилиндру, выталкивают готовый брикет из второй камеры пресс-формы через специальные отверстия в передней панели. Поршень наполнителя поднимается вверх. Загрузочный шнек начинает подачу следующей порции прессуемого материала. Прессующий цилиндр (7) возвращается в исходное положение, пресс-форма перемещается (4), после чего последовательность операций, следующих после окончания загрузки наполнителя, повторяется.

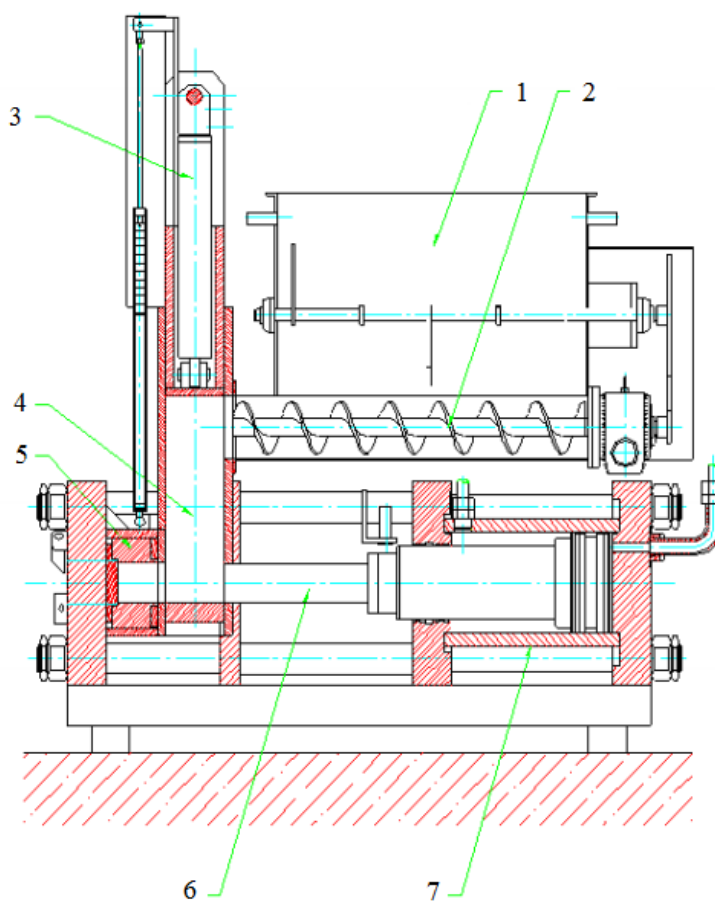


Рисунок 1.2 – Схема гидравлического пресса:

1 – бункер, 2 – загрузочный шнек, 3 – поршень наполнителя, 4 – камера наполнителя, 5 – пресс-форма, 6 – главный прессующий поршень, 7 – прессующий цилиндр

Общий вид гидравлических брикетных прессов (на примере модельного ряда фирмы RUF) представлен на рисунках 1.3, 1.4.



Рисунок 1.3 – Общий вид пресса модельного ряда RUF 100-600 [105]



Рисунок 1.4 – Общий вид пресса RUF 1100 [105]

Технические характеристики модельного ряда прессов фирмы RUF представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Технические характеристики модельного ряда прессов фирмы RUF [105]

Технические данные	RUF100	RUF200	RUF400	RUF600	RUF1100	RUF1500
Производительность, шт./мин	2,5	4	7	11	10	7,5
Производительность, кг/час	121,5	194,4	340,2	534,6	907,2	1544,4
Влажность материала, %	<15	<15	<15	<15	<15	<15
Мощность двигателя, кВт	7,5	11	22	37	55	90
Максимальное удельное давление, МПа	171,1	171,1	171,1	171,1	177,6	170
Габариты брикета (мм) (длина х ширина, высота)	150 х 60, 40 - 110	150 х 60, 40 - 110	150 х 60, 40 - 110	150 х 60, 40 - 110	240 х 70, 40 - 110	260 х 100, 80 - 140
Габариты пресса без бункера (мм) (длина х ширина х высота)	2700 х 1600 х 2000	2700 х 1600 х 2000	2700 х 1900 х 2100	2000 х 2000 х 2100	2600 х 2300 х 2100	2900 х 3300 х 2257
Вес агрегата, кг	2500	2800	3500	4200	6300	11000

Характеристики прессов других производителей (например, Hoescker Polytechnik, C.F. Nielsen, Schuko, CO.MA.FER S.p.a, Mischi Maschinen) схожи с представленными в таблице 1.4: максимальное давление прессования составляет свыше 150 МПа, что достаточно для производства брикетов с высокой плотностью, свыше 1,2 г/см³, однако производительность прессов, как правило, ниже.

В таблице 1.5 представлены ориентировочные сведения [39], дающие представление о рентабельности производства биотоплива с использованием гидравлического пресса.

Таблица 1.5 – Оценка рентабельности продукции брикетного производства [39]

Технические параметры	Единица измерения	Количество
Задаваемые параметры		
Количество брикетов в час	шт/ч	660
Номинальная потребляемая электроэнергия	кВт/ч	30
Вес брикета	кг	0,83
Количество рабочих часов в сутки	ч	22
Количество рабочих дней в месяце	дн	26
Вычисляемые параметры		
Количество произведенных тонн в месяц	т	313
Количество отработанных часов в месяц	ч	572
Экономические параметры	RUR	EUR
Задаваемые параметры		
Цена электроэнергии за кВт	2	0,03
Цена упаковочного материала на 1 т брикетов	280	4,31
Цена сырья на 1т брикетов	400	6,15

Брутто-зарплата рабочим на 1т брикетов	200	3,08
Вычисляемые расходы за месяц		
Электроэнергия	34320	528,00
Упаковочный материал	87640	1348,31
Брутто-зарплата рабочим	62600	963,08
Сырьё	125200	1926,15
Расходы на сервис оборудования (приблизительно 1 EUR/час)	37180	572,00
Дополнительные расходы		
Аренда помещения в месяц	0	0
Рентабельность производства	RUR	EUR
Цена брикетов за тонну	6500	100
Реализация в месяц	2034500	31300
Себестоимость 1т брикетов	1108,43	17,05
Себестоимость производства в месяц	346940	5337,54
Прибыль от реализации 1 тонны брикетов	5391,57	82,95
Прибыль в месяц	1687561,41	25963,35

1.3. Анализ научных сведений по тематике исследования

1.3.1. Экспериментальные сведения о прочности и плотности брикетов из измельченной древесины

Качество получаемого брикета зависит от многих факторов, основными из которых являются: химический состав и физическое состояние прессуемого материала, его влажность, фракционный состав и величина брикетируемых частиц, температура нагрева перед прессованием, усилие прессования, время выдержки под давлением [45].

Несмотря на распространение процесса брикетирования в лесоперерабатывающей промышленности, систематизированных научных сведений нём сравнительно мало. Среди отечественных исследований необходимо отметить монографию [45], изданную ещё в 1971 году.

Авторы [45] приводят результаты экспериментальных исследований прессования опилок и измельченной коры на штемпельных и гидравлических прессах.

На рисунке 1.5 представлена зависимость плотности брикетов от удельного давления прессования. Брикеты получены из подогретых до 80°C опилок влажностью 11 % на штемпельном прессе Ганц.

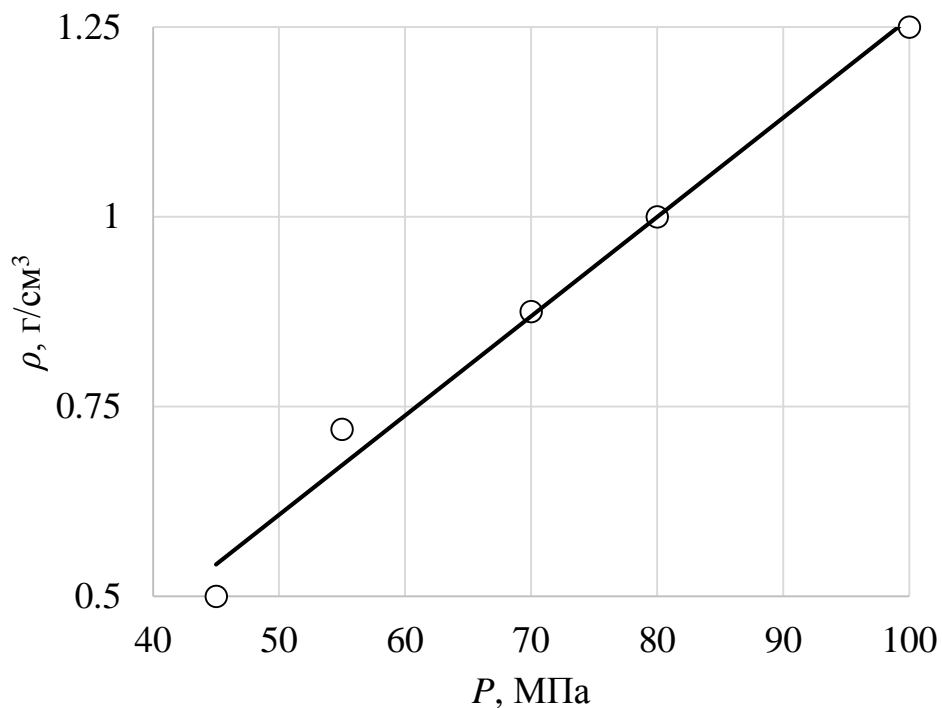


Рисунок 1.5 – Влияние давления прессования на плотность брикетов [45]

На графике зависимость плотности от давления прессования близка к линейной, брикеты с плотностью свыше 1 г/см³ получались при давлении прессования от 80 МПа.

На рисунке 1.6 представлена зависимость плотности брикетов от удельного давления прессования. Брикеты получены в лабораторных условиях из опилок и измельченной коры при комнатной температуре на штемпельном прессе УИМ-50М.

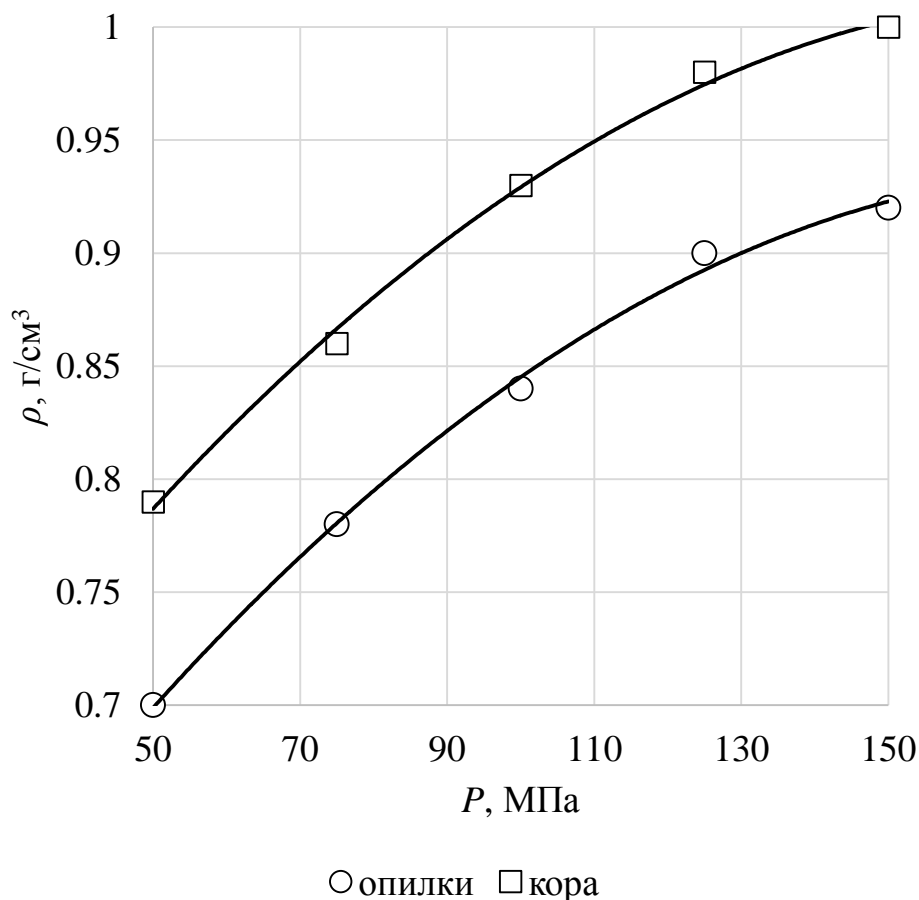


Рисунок 1.6 – Влияние давления прессования на плотность брикетов [45]

Меньшие значения плотности брикетов, по сравнению со случаем прессования на прессе Ганц, вызваны отсутствием прогрева материала. Для получения брикетов с плотностью больше 1 г/см³ с использованием штемпельного прессы требуется удельное давление прессования > 150 МПа.

По графикам на рисунке 1.6 можем заключить, что при равных давлениях плотность брикетов из коры больше плотности брикетов из опилок на величину до 15 %.

На рисунке 1.7 проиллюстрировано влияние содержания измельченной коры в смеси с опилками на прочность брикетов при изгибе (брикеты получены

на штемпельном прессе при комнатной температуре материала, влажность материала составляла 8-10 %, давление прессования 100 МПа).

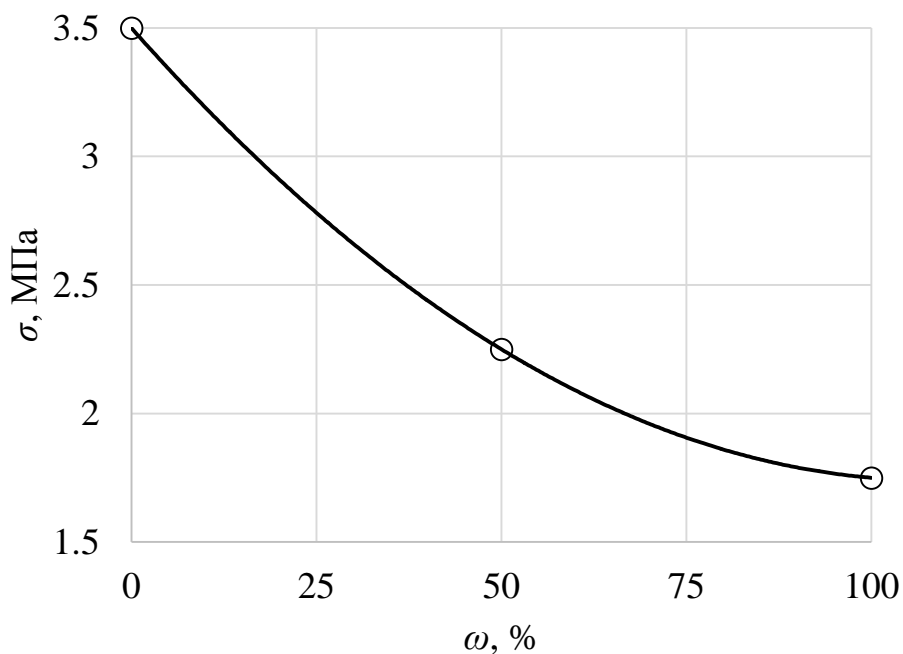
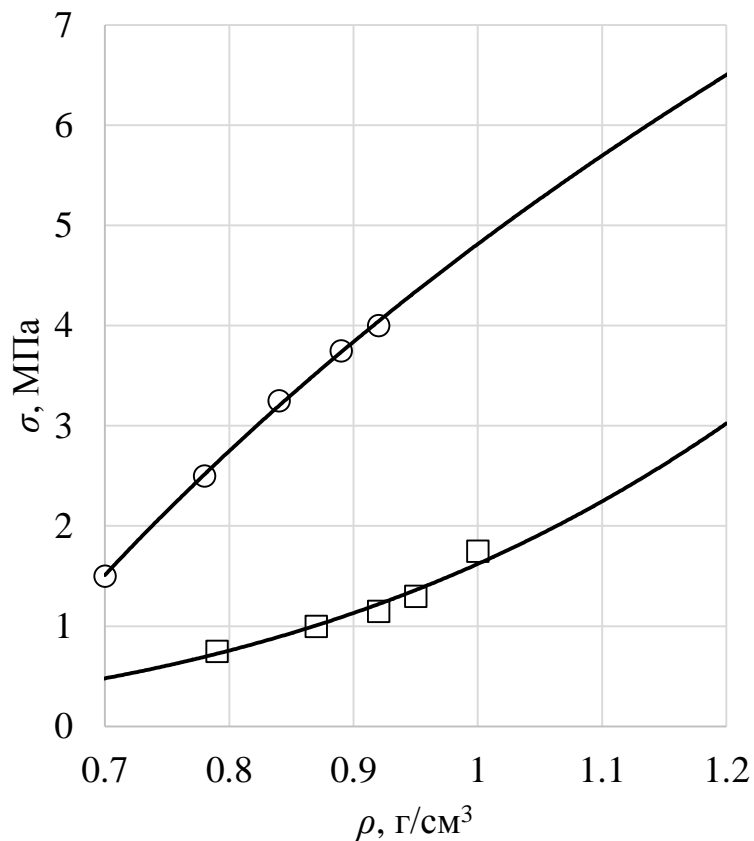


Рисунок 1.7 – Влияние массовой доли коры в сырье для брикетирования на прочность брикетов [45]

Как показывает график, брикеты со включением коры и полностью корьевые брикеты обладают меньшей прочностью по сравнению с брикетами из опилок без коры. При давлении прессования 100 МПа прочность на изгиб у брикетов из опилок составляет порядка 3,5 МПа, у брикетов из коры – 1,75 МПа. Отметим нелинейное влияние процентного содержания коры на прочность брикетов.

На рисунке 1.8 представлены сведения о влиянии плотности брикетов из опилок и из коры на их изгибную прочность (брикеты получены на штемпельном прессе при комнатной температуре, влажность материала составляла 8-10 %, давление прессования варьировалось).



○ брикеты из опилок □ брикеты из коры

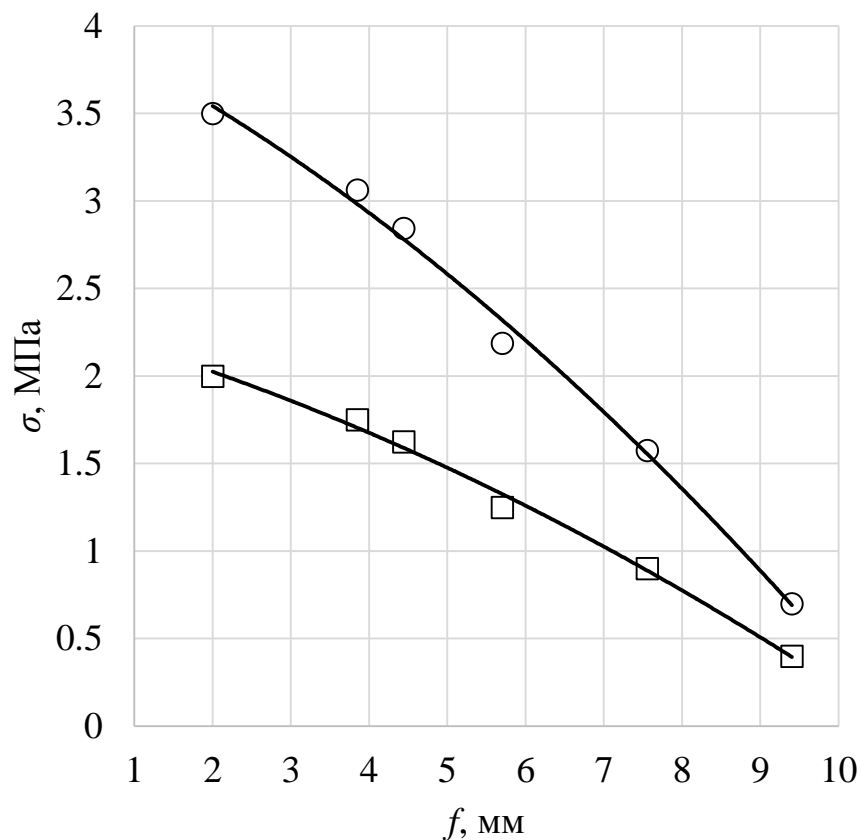
Рисунок 1.8 – Влияние плотности брикетов из опилок и коры на их прочность

[45]

Во всем представленном диапазоне плотности прочность корьевых брикетов приблизительно вдвое ниже прочности брикетов из опилок.

На рисунке 1.9 представлены графики, иллюстрирующие влияние крупности экспериментального материала на прочность получаемых брикетов. В [45] не указывается, при каких значениях давления прессования получены брикеты, подвергнутые испытаниям на прочность. Таким образом, однозначно заключить, вызвано ли заметное снижение прочности брикетов большей жесткостью крупной фракции прессуемого материала, и, как следствие, меньшей плотностью брикета

при постоянном давлении прессования, либо структурой брикета из сырья крупной фракции, либо сочетанием этих двух причин, затруднительно.



○ брикеты из опилок и щепы □ брикеты из коры

Рисунок 1.9 – Влияние средней крупности сырья на прочность брикетов [45]

Можно предположить, что брикетировать сырьё крупнее 5 мм, не целесообразно.

На рисунке 1.10 проиллюстрировано влияние влажности опилок на прочность получаемых брикетов. Наилучшие показатели достигаются при прессовании опилок с влажностью в пределах 5-10 %. На схожем диапазоне влажности брикета настаивают и стандарты качества биотоплива.

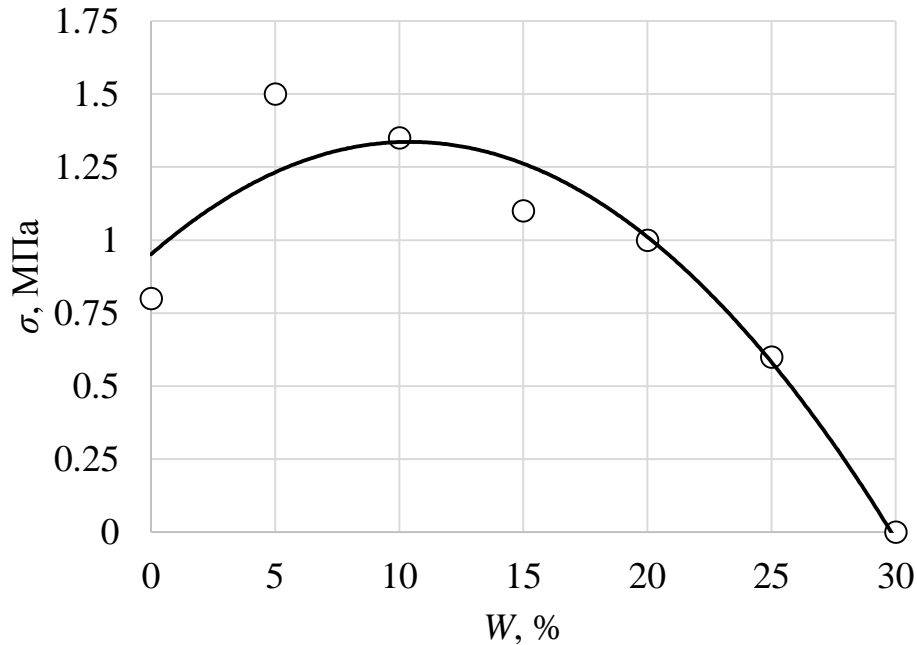


Рисунок 1.10 – Влияние влажности опилок на прочность брикетов [45]

Отметим снижение прочности брикетов при влажности материала менее 5 %. Как и в случае с фракционным составом, затруднительно дать однозначное заключение, чем обусловлено снижение прочности: меньшей плотностью брикетов из более жёстких сухих опилок либо самой структурой брикетов.

Также обращает на себя внимание область 5-15 % влажности, в которой, предположительно, находится оптимальное значение влажности опилок с точки зрения прочности брикета.

Резюмируя рассмотренные экспериментальные сведения, отметим недостаток данных, полученных по результатам многофакторных экспериментов с учётом взаимодействия различных факторов (плотности брикета, включения коры, крупности прессуемого материала и его влажности, давления прессования). По этой причине считаем целесообразным проведение многофакторного эксперимента для получения математических моделей, позволяющих прогнози-

ровать плотность и прочность брикетов при варьировании параметров прессуемого материала. При этом в плане эксперимента необходимо исходить из возможности получения регрессионных моделей старше порядка, что подтверждают данные, полученные ранее (рисунки 1.5 – 1.10).

1.3.2. Теоретические сведения о прессовании измельченных древесных материалов

Одним из важнейших параметров, характеризующих опилки либо кору при уплотнении, является модуль деформации.

При прессовании материал претерпевает большие относительные деформации, меняются его физико-механические свойства, в том числе и модуль деформации. В общем виде решение задачи об оценке связи давления прессования и модуля деформации представлено в [26], [32].

В работе [66] нами для оценки модуля деформации использованы данные [45], представленные на рисунке 1.11.

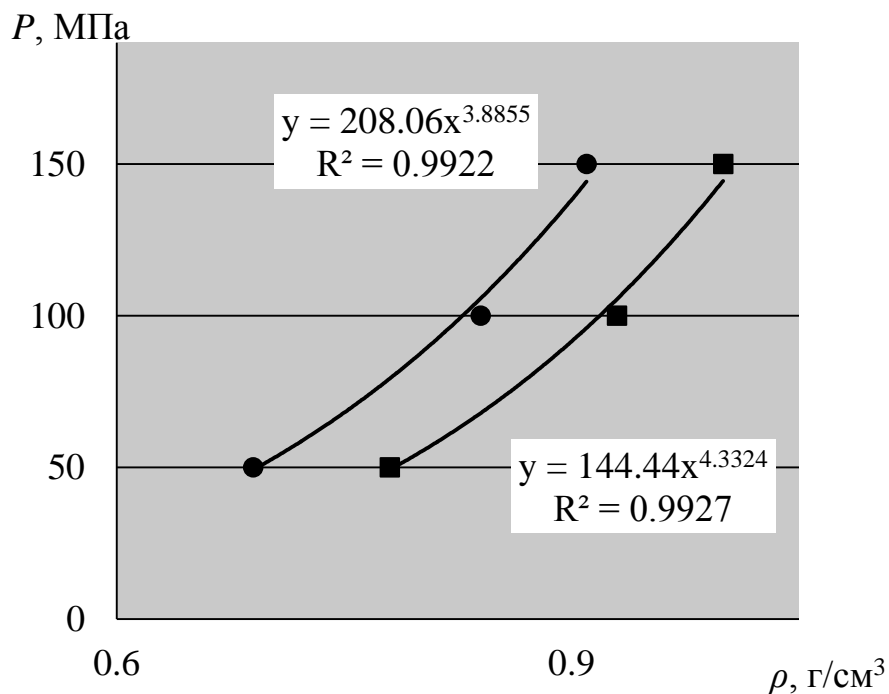


Рисунок 1.11 – Зависимость давления прессования от требуемой плотности брикетов (штемпельный пресс) (круглые маркеры – опилки, квадратные маркеры – кора)

Графики на рисунке 1.11 показывают, что в общем виде зависимости давления прессования P от плотности брикетов ρ можно описать степенными функциями:

$$P = A \cdot \rho^B \quad (1.2)$$

где A, B – числовые коэффициенты.

Модуль деформации при уплотнении по определению представляет собой отношение:

$$E = \frac{dP}{d\varepsilon} \quad (1.3)$$

где ε – относительная деформация сжатия.

С учетом зависимости для плотности:

$$\rho = \rho_0 \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (1.4)$$

где ρ_0 – начальная плотность материала, после дифференцирования получим из выражения (1.3):

$$E = \frac{AB}{1 - \varepsilon} \cdot \left(\frac{\rho_0}{1 - \varepsilon} \right)^B \quad (1.5)$$

Результаты расчета по формуле (1.5) с учетом значений коэффициентов (рисунок 1.11) представлены на рисунке 1.12.

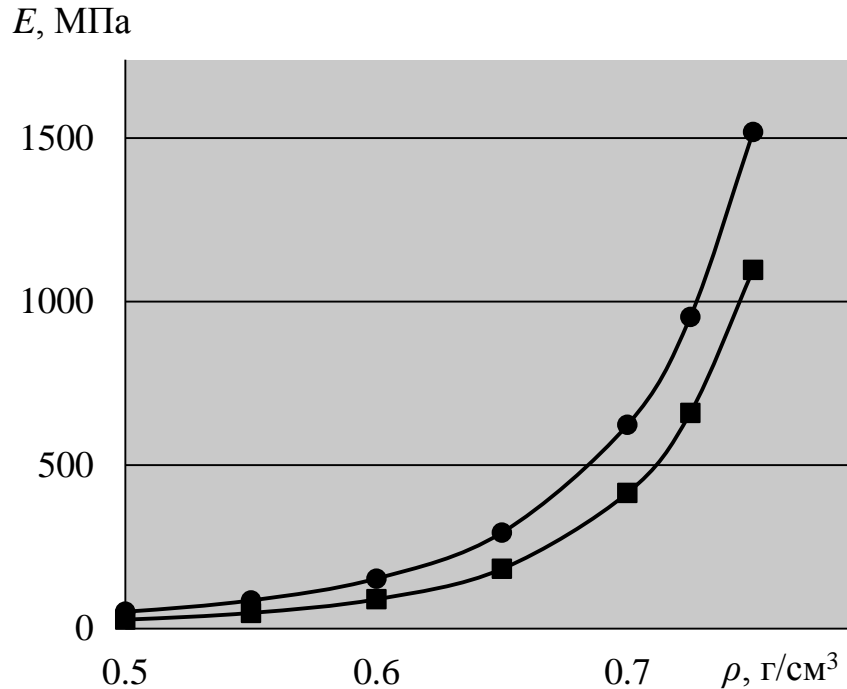


Рисунок 1.12 – Зависимость модуля деформации от относительной деформации брикетов (штемпельный пресс)
(круглые маркеры – опилки, квадратные маркеры – кора)

Отмечена необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований с целью анализа влияния большего числа факторов на модуль деформации. При этом в плане эксперимента необходимо исходить из возможности получения регрессионных моделей второго порядка, что следует из вида кривых на рисунке 1.12.

Известны и теоретические сведения об оценке деформативных свойств прессуемого материала. В [32], [33] представлены таблицы, содержащие результаты теоретического расчёта упругих постоянных конгломерата древесных частиц различных пород древесины. Данные получены с использованием методов осреднения Фойгта, Ройсса и Хилла, рассмотренных в работах [12], [24], [36], [55], [56], [69].

Таблица 1.6 – Осредненные упругие постоянные конгломерата
древесных частиц [32], [33]

Порода древесины	Осреднение	E , МПа	ν	G , МПа
Сосна	Метод Фойгта	2136,7	0,27	1240,0
	Метод Ройсса	486,5	0,20	256,6
	Метод Хилла	1311,6	0,24	748,3
Берёза	Метод Фойгта	2918,9	0,30	1647,7
	Метод Ройсса	982,4	0,19	503,8
	Метод Хилла	1950,7	0,25	1075,8

Данные, представленные в таблице 1.6, противоречивы. Частицы прессуемого материала ориентированы в пространстве прессформы хаотически, вследствие чего брикетизируемый материал должен отличаться изотропией деформативных свойств. Однако, условие изотропности $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ для данных, представленных в таблице 1.6, не выполняется. Это обусловлено тем, что осреднение выполнено с учетом разброса частиц только в плоскости, нормальной к направлению прессования, что принято при описании прессования стружечных плит. Полагаем целесообразным провести дополнительные теоретические исследования для оценки деформативных свойств конгломерата прессуемых древесных частиц.

1.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. В соответствии с действующим европейским стандартом, топливные брикеты должны иметь плотность свыше 1 г/см^3 , влажность до 15 % и зольность в пределах 0,7 – 3 %, допускается содержание в брикетах коры. С учётом ограничения по влажности, теплотворная способность брикетов не ниже требуемой стандартом. Технические требования к биотопливу, разработанные в России, в целом, настаивают на схожих характеристиках топливных брикетов.
2. Известные теоретические данные, относящиеся к оценке деформативных свойств брикетируемого древесного материала, противоречивы. Полагаем целесообразным провести дополнительные теоретические исследования для оценки деформативных свойств конгломерата прессуемых древесных частиц.
3. Для разработки адекватных математических моделей брикетирования измельченной древесной массы необходимы дальнейшие экспериментальные исследования с целью анализа влияния большего числа факторов на деформативные свойства опилок и измельченной коры при прессовании. При этом в плане эксперимента необходимо исходить из возможности получения регрессионных моделей второго порядка.
4. При исследовании прочности и плотности брикетов представляется целесообразным включить в план эксперимента в качестве управляемых факторов влажность и среднюю крупность материала, плотность брикета, процентное содержание измельченной коры в экспериментальном материале,

потребное удельное давление прессования. В плане эксперимента необходимо исходить из возможности получения регрессионных моделей второго порядка.

5. С учётом действующих стандартов качества брикетов, а также имеющихся экспериментальных данных, представленных в исследованиях, выполненных ранее, следует ориентироваться на диапазоны изменения управляемых факторов: влажность экспериментального материала от 5 до 15 %, средняя крупность от 1 до 5 мм, содержание коры от 0 до 100 %. Экспериментальный пресс должен обеспечивать давление прессования до 150 – 200 МПа.

Цель работы – совершенствование процесса производства брикетов с использованием гидравлических прессов на базе дальнейших исследований уплотнения измельченных древесных материалов.

Задачи исследования:

1. Провести теоретические исследования деформативных свойств конгломерата древесных частиц и оценить значения модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона прессуемого сырья.
2. Разработать уточненную математическую модель процесса прессования древесных частиц в закрытой матрице и определить значения ее параметров в зависимости от свойств сырья и конечной плотности брикета.
3. Провести экспериментальные исследования плотности брикетов, получаемых на гидравлическом прессе, с учётом влажности и средней крупности материала, процентного содержания измельченной коры в экспериментальном материале, давления прессования.
4. Провести экспериментальные исследования прочности брикетов, получаемых на гидравлическом прессе, с учётом влажности и средней крупности материала, процентного содержания измельченной коры в экспериментальном материале, давления прессования.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕССОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ

2.1. Деформативные свойства конгломерата частиц древесины

Зададимся целью получить зависимости для расчёта модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона прессуемой древесной массы. Прессуемый материал рассмотрим как конгломерат древесных частиц, хаотически ориентированных в пространстве прессформы. Для оценки его упругих свойств использованы методы осреднения Фойгта и Ройсса, изложенные в работах [12], [24], [36], [55], [56], [69].

Для получения численных результатов используем справочные данные о значениях коэффициентов деформации (элементов матрицы податливости) и физических модулей упругости (элементов матрицы упругости) основных пород древесины в направлении главных осей упругой симметрии (продольное направление относительно волокон, радиальное направление и тангенциальное направление).

На первом этапе оценки упругих постоянных получим для конгломератов с плотностью цельной древесины (при расчёте осредненных значений упругих постоянных используем значения упругих постоянных цельной древесины).

Осредненные коэффициенты податливости вычислим как математические ожидания коэффициентов податливости при предположении о хаотическом раз-

бросе частиц в пространстве прессформы (метод Ройсса, базирующийся на предположении о том, что напряжённое состояние частицы в каждой точке совпадает с напряжённым состоянием конгломерата) [12], [55], [56].

Осредненные коэффициенты упругости вычислим как математические ожидания элементов матрицы упругости при предположении о разбросе частиц в пространстве прессформы (метод Фойгта, основанный на предположении о том, что деформации частицы совпадают с деформациями конгломерата) [12], [55], [56].

На втором этапе сопоставим осреднённые технические упругие постоянные конгломератов частиц древесины различных пород с плотностью цельной древесины. Результаты сопоставления используем для получения зависимости осреднённого модуля упругости конгломерата древесных частиц от плотности цельной древесины и осреднённого модуля сдвига конгломерата древесных частиц от плотности цельной древесины.

2.1.1. Упругие и прочностные свойства древесины

Древесину принято рассматривать как материал с ортогональной схемой анизотропии упругих свойств с главными осями упругой симметрии a (1) (продольное направление относительно волокон), r (2) (радиальное направление) и t (3) (тангенциальное направление) [4], [5]. При силовых воздействиях по направлениям этих осей зависимость между напряжениями и деформациями записывается в виде обобщённого закона Гука [38]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z; & \gamma_{zy} = a_{44}\tau_{zy} \\ \varepsilon_y = a_{21}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{23}\sigma_z; & \gamma_{zx} = a_{55}\tau_{zx}, \\ \varepsilon_z = a_{31}\sigma_x + a_{32}\sigma_y + a_{33}\sigma_z; & \gamma_{xy} = a_{66}\tau_{xy} \end{cases} \quad (2.1)$$

в матричной форме записи закон (2.1) записывается следующим образом [2], [3], [54]:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{zy}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}$ – составляющие деформаций в направлении главных осей упругой симметрии, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$ – составляющие напряжений в направлении главных осей упругой симметрии, a_{jk} – физические упругие постоянные древесины в главных направлениях упругой симметрии (физические коэффициенты деформации).

Коэффициенты a_{jk} связаны с техническими упругими постоянными следующими формулами [55]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
a_{11} = \frac{1}{E_{11}} = \frac{1}{E_a} \\
a_{22} = \frac{1}{E_{22}} = \frac{1}{E_r} \\
a_{33} = \frac{1}{E_{33}} = \frac{1}{E_t} \\
a_{12} = a_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} = -\frac{\nu_{ar}}{E_a} = -\frac{\nu_{ra}}{E_r} \\
a_{23} = a_{32} = -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} = -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} = -\frac{\nu_{rt}}{E_r} = -\frac{\nu_{tr}}{E_t} \\
a_{13} = a_{31} = -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} = -\frac{\nu_{at}}{E_a} = -\frac{\nu_{ta}}{E_t} \\
a_{44} = \frac{1}{G_{23}} = \frac{1}{G_{rt}} \\
a_{55} = \frac{1}{G_{13}} = \frac{1}{G_{at}} \\
a_{66} = \frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_{ar}}
\end{array} \right. \quad (2.3)$$

где $E_{11} = E_a$, $E_{22} = E_r$, $E_{33} = E_t$ – модули продольной упругости в направлении главных осей упругой симметрии; $\nu_{12} = \nu_{ar}$, $\nu_{21} = \nu_{ra}$, $\nu_{23} = \nu_{rt}$, $\nu_{32} = \nu_{tr}$, $\nu_{13} = \nu_{at}$, $\nu_{31} = \nu_{ta}$ – коэффициенты Пуассона, характеризующие поперечную деформацию в направлении оси, соответствующей первому индексу, от усилия, действующего по оси, соответствующей второму индексу; $G_{23} = G_{rt}$, $G_{13} = G_{at}$, $G_{12} = G_{ar}$ – модули сдвига в плоскостях, соответствующих индексам.

Закон Гука также представляют в форме, связывающий напряжения с деформациями [38]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\sigma_x = A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + A_{13}\varepsilon_z; \quad \tau_{zy} = A_{44}\gamma_{zy} \\
\sigma_y = A_{21}\varepsilon_x + A_{22}\varepsilon_y + A_{23}\varepsilon_z; \quad \tau_{zx} = A_{55}\gamma_{zx}, \\
\sigma_z = A_{31}\varepsilon_x + A_{32}\varepsilon_y + A_{33}\varepsilon_z; \quad \tau_{xy} = A_{66}\gamma_{xy}
\end{array} \right. \quad (2.4)$$

в матричной форме записи формулировку закона (2.4) записывают следующим образом [2], [3], [54]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

где A_{jk} – физические модули упругости.

Кроме того, следует отметить, что физические коэффициенты деформации и модули упругости связаны между собой, поскольку являются элементами взаимно обратных матриц [2], [3], [54]:

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{pmatrix}^{-1} \quad (2.6)$$

Значения физических и технических модулей упругости, коэффициентов Пуассона, а также физических коэффициентов деформации представлены в таблицах 2.1 – 2.4.

Таблица 2.1 – Значения технических упругих постоянных основных пород древесины [4], [5], [55], [56]

Порода	Модуль упругости, МПа			Модуль сдвига, МПа		
	$E_{11} = E_a$	$E_{22} = E_r$	$E_{33} = E_t$	$G_{23} = G_{rt}$	$G_{13} = G_{at}$	$G_{12} = G_{ar}$
Ель	14200	590	360	35	416	645
Сосна	11700	620	500	67	690	1180
Береза	16600	1120	630	190	1040	1095
Ясень	16000	1530	820	277	1000	1310

Порода	Модуль упругости, МПа			Модуль сдвига, МПа		
	$E_{11} = E_a$	$E_{22} = E_r$	$E_{33} = E_t$	$G_{23} = G_{rt}$	$G_{13} = G_{at}$	$G_{12} = G_{ar}$
Бук	14000	2280	1160	470	950	1970
Дуб	14000	1290	910	440	910	1320

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов Пуассона основных пород древесины [4], [5], [55], [56]

Порода	Коэффициент Пуассона					
	ν_{tr}	ν_{rt}	ν_{at}	ν_{ta}	ν_{ra}	ν_{ar}
Ель	0,253	0,415	0,421	0,011	0,023	0,557
Сосна	0,429	0,532	0,454	0,019	0,020	0,380
Береза	0,409	0,728	0,452	0,017	0,034	0,497
Ясень	0,370	0,691	0,528	0,027	0,047	0,491
Бук	0,371	0,729	0,521	0,043	0,073	0,449
Дуб	0,463	0,656	0,897	0,058	0,055	0,595

Таблица 2.3 – Значения коэффициентов деформации (элементов матрицы податливости) основных пород древесины, 10^{-4} МПа [4], [5], [55], [56]

Порода	a_{11}	a_{22}	a_{33}	a_{12}	a_{13}	a_{23}	a_{44}	a_{55}	a_{66}
Ель	0,7042	16,9492	27,7778	-0,3922	-0,2968	-7,0315	285,7143	24,0385	15,5039
Сосна	0,8547	16,1290	20,0000	-0,3244	-0,3883	-8,5839	149,2537	14,4928	8,4746
Береза	0,6024	8,9286	15,8730	-0,2994	-0,2724	-6,4980	52,6316	9,6154	9,1324
Ясень	0,6250	6,5359	12,1951	-0,3071	-0,3301	-4,5154	36,0877	10,0000	7,6336
Бук	0,7143	4,3860	8,6207	-0,3208	-0,3718	-3,1965	21,2766	10,5263	5,0761
Дуб	0,7143	7,7519	10,9890	-0,4249	-0,6409	-5,0852	22,7273	10,9890	7,5758

Таблица 2.4 – Значение физических модулей упругости (элементов матрицы упругости) основных пород древесины в направлении главных осей упругой симметрии, МПа [4], [5], [55], [56]

Порода	A_{11}	A_{22}	A_{33}	A_{12}	A_{13}	A_{23}	A_{44}	A_{55}	A_{66}
ель	14563	673	407	449	269	175	35	416	645
сосна	12080	822	664	477	439	362	67	690	1180
береза	17519	1671	931	1148	771	704	190	1040	1095
ясень	17296	2191	1164	1527	1033	852	277	1000	1310
бук	15810	3449	1736	2266	1522	1377	470	950	1970
дуб	17227	2160	1555	2302	2070	1134	440	910	1320

В таблице 2.5 представлены пределы прочности при растяжении и сжатии в главных направлениях симметрии прочности для основных пород древесины.

Таблица 2.5 – Пределы прочности некоторых пород древесины при растяжении и сжатии в главных направлениях симметрии прочности, МПа [4], [5], [55], [56]

Порода	При растяжении			При сжатии		
	σ^+_a	σ^+_r	σ^+_t	σ^-_a	σ^-_r	σ^-_t
Ель	100	4,8	3	39		
Сосна	103	4,8	4,8	45	3,6	6,7
Береза	169	10,9	6,9	77	12,3	6,5
Ясень	139	8,7	6,7	50	9	9,9
Бук	118	12,1	7,9	47,5	7,8	5,2
Дуб	-	7,7	6	51	7,6	5,6

Обращает на себя внимание связь технических модулей деформации и пределов прочности при сжатии по основным направлениям симметрии прочности, графически эти зависимости представлены на рисунках 2.1 – 2.3.

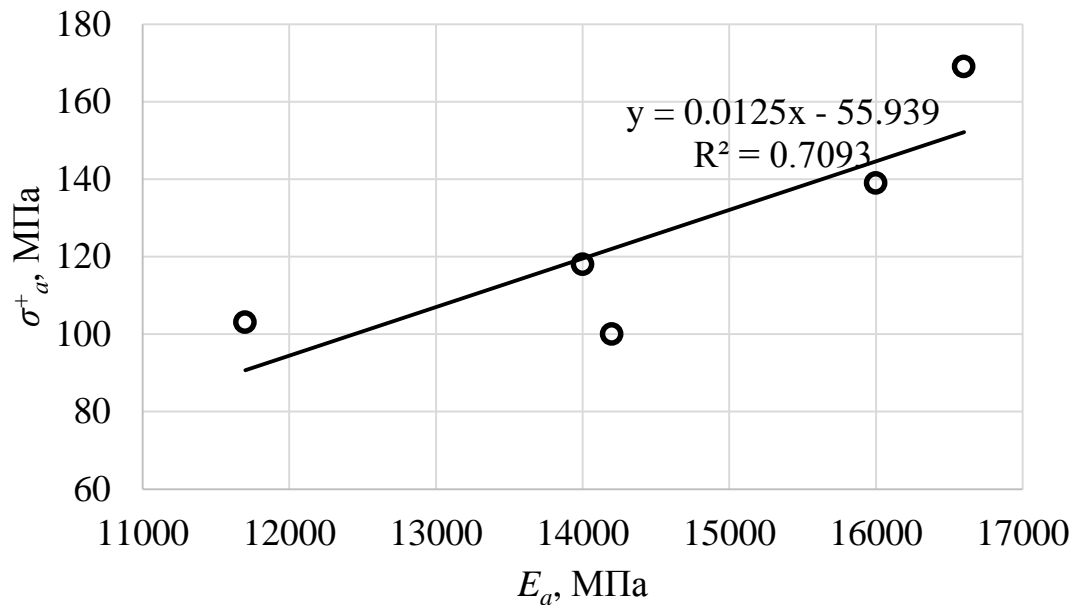


Рисунок 2.1 – Зависимость предела прочности древесины при сжатии в продольном направлении от технического модуля упругой деформации

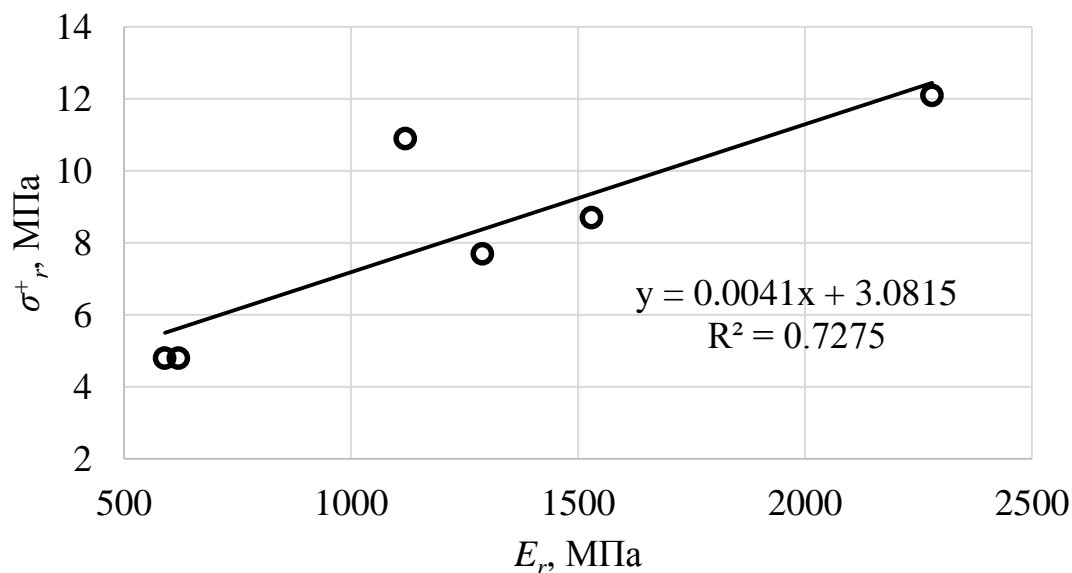


Рисунок 2.2 – Зависимость предела прочности древесины при сжатии в радиальном направлении от технического модуля упругой деформации

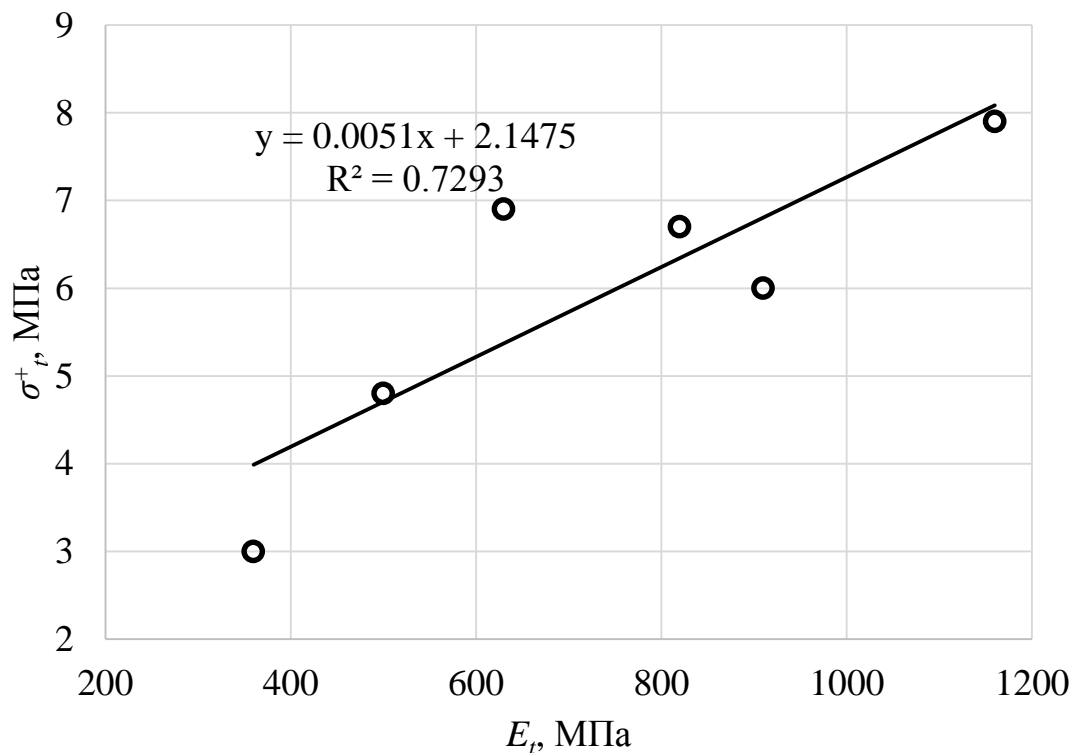


Рисунок 2.3 – Зависимость предела прочности древесины при сжатии в тангенциальном направлении от технического модуля упругой деформации

При переходе от одной системы координат к другой упругие свойства анизотропного материала в новой системе координат рассчитываются по специальным формулам, доказательство которых подробно изложено в работе [38]. Кратко изложим основные зависимости, необходимые для расчётов в нашем исследовании.

Зададимся ортогональной системой координат $Oxuz$, жёстко связанной с прессуемым материалом. Кроме того, для i -ой частицы введём подвижную ортогональную систему координат $Ox_iy_iz_i$, оси которой совпадают с направлениями упругой симметрии частицы. Схема перехода от системы координат $Oxuz$ к системе $Ox_iy_iz_i$ представлена на рисунке 2.4.

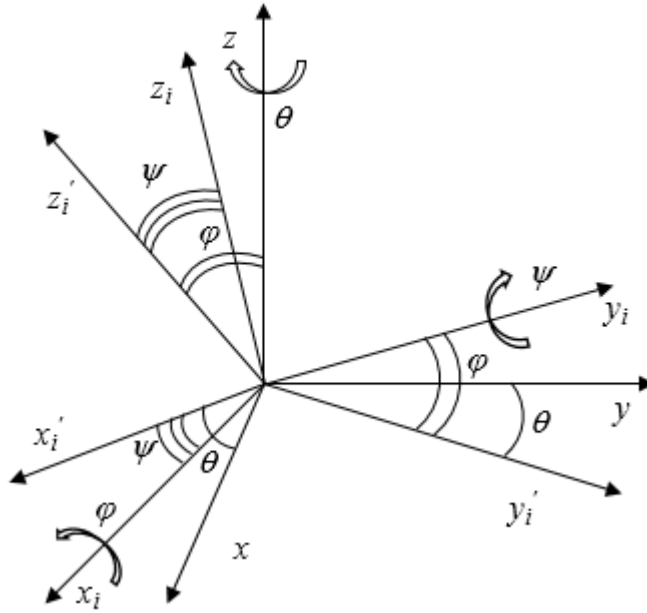


Рисунок 2.4 – Схема перехода от системы координат $Oxyz$ к системе $Ox_iy_iz_i$

При повороте вокруг оси y на угол θ ось x занимает положение x_i' , ось z – положение z_i' , ось y не меняет своего положения. Косинусы между осями координат системы $Oxyz$ и системе $Ox_iy_iz_i$ представим в матричном виде [14], [38]:

$$L_y = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

При повороте вокруг оси z_i' на угол φ ось x_i' занимает положение x_i , ось y – положение y_i' , ось z_i' не меняет своего положения. Косинусы между осями координат системы $Oxyz$ и системы $Ox_iy_iz_i$ представим в матричном виде [14], [38]:

$$L_z = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

При повороте вокруг оси x_i на угол ψ ось y_i занимает положение y_i , ось z_i – положение z_i , ось x_i не меняет своего положения. Косинусы между осями координат системы $Oxyz$ и системы $Ox_iy_iz_j$ представим в матричном виде [14], [38]:

$$L_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Для получения матрицы направляющих косинусов при вращении анизотропной среды вокруг трёх осей упругой симметрии найдём произведение матриц:

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

В итоге получим следующую матрицу направляющих косинусов:

$$L = \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\theta & -\sin\varphi & -\cos\varphi\sin\theta \\ \cos\psi\sin\varphi\cos\theta - \sin\psi\sin\theta & \cos\psi\cos\varphi & -\cos\psi\sin\varphi\sin\theta - \sin\psi\cos\theta \\ \sin\psi\sin\varphi\cos\theta + \cos\psi\sin\theta & \sin\psi\cos\varphi & -\sin\psi\sin\varphi\sin\theta + \cos\psi\cos\theta \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Располагая матрицей направляющих косинусов, элементы матрицы податливости и матрицы упругости при переходе от подвижной системы к жёсткой определим по формулам [14], [38]:

$$a_{jk}^i = \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 a_{mn} q_{jm} q_{kn} \quad (2.12)$$

$$A_{jk}^i = \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 A_{mn} q_{jm} q_{kn} \quad (2.13)$$

Символы q введены для удобства записи, их расшифровка представлена в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Символы q для расчёта элемента матриц упругости и податливости при смене системы координат

Для пересчёта элементов матрицы податливости						
	1	2	3	4	5	6
1	l_{11}^2	l_{12}^2	l_{13}^2	$l_{12}l_{13}$	$l_{13}l_{11}$	$l_{12}l_{11}$
2	l_{21}^2	l_{22}^2	l_{23}^2	$l_{23}l_{22}$	$l_{23}l_{21}$	$l_{22}l_{21}$
3	l_{31}^2	l_{32}^2	l_{33}^2	$l_{33}l_{32}$	$l_{33}l_{31}$	$l_{32}l_{31}$
4	$2l_{31}l_{21}$	$2l_{32}l_{22}$	$2l_{33}l_{23}$	$l_{33}l_{22} + l_{32}l_{23}$	$l_{33}l_{21} + l_{31}l_{23}$	$l_{31}l_{22} + l_{32}l_{21}$
5	$2l_{31}l_{11}$	$2l_{32}l_{12}$	$2l_{33}l_{13}$	$l_{33}l_{12} + l_{32}l_{13}$	$l_{33}l_{11} + l_{31}l_{13}$	$l_{31}l_{12} + l_{32}l_{11}$
6	$2l_{21}l_{11}$	$2l_{12}l_{22}$	$2l_{13}l_{23}$	$l_{13}l_{22} + l_{12}l_{23}$	$l_{13}l_{21} + l_{11}l_{23}$	$l_{11}l_{22} + l_{12}l_{21}$
Для пересчёта элементов матрицы упругости						
	1	2	3	4	5	6
1	l_{11}^2	l_{12}^2	l_{13}^2	$2l_{12}l_{13}$	$2l_{13}l_{11}$	$2l_{12}l_{11}$
2	l_{21}^2	l_{22}^2	l_{23}^2	$2l_{23}l_{22}$	$2l_{23}l_{21}$	$2l_{22}l_{21}$
3	l_{31}^2	l_{32}^2	l_{33}^2	$2l_{33}l_{32}$	$2l_{33}l_{31}$	$2l_{32}l_{31}$
4	$l_{31}l_{21}$	$l_{32}l_{22}$	$l_{33}l_{23}$	$l_{33}l_{22} + l_{32}l_{23}$	$l_{33}l_{21} + l_{31}l_{23}$	$l_{31}l_{22} + l_{32}l_{21}$
5	$l_{31}l_{11}$	$l_{32}l_{12}$	$l_{33}l_{13}$	$l_{33}l_{12} + l_{32}l_{13}$	$l_{33}l_{11} + l_{31}l_{13}$	$l_{31}l_{12} + l_{32}l_{11}$
6	$l_{21}l_{11}$	$l_{12}l_{22}$	$l_{13}l_{23}$	$l_{13}l_{22} + l_{12}l_{23}$	$l_{13}l_{21} + l_{11}l_{23}$	$l_{11}l_{22} + l_{12}l_{21}$

(в таблице l_{jk} обозначены направляющие косинусы)

Выражения для коэффициентов a_{jk}^i и A_{jk}^i приведены в приложении к работе.

2.1.2. Упругие свойства конгломерата древесных частиц

Прессуемый материал рассмотрим как конгломерат древесных частиц, хаотически ориентированных в трёхмерном пространстве. Для оценки его упругих свойств пользуются методами осреднения, описанными в [12], [24], [36], [55], [56], [73].

Ранее осреднённые упругие свойства прессуемой древесной массы определяли в работах [55] и [33], однако численные решения получены только для случаев прессования частиц, хаотически ориентированных в плоскости, нормальной к направлению усилия прессования.

Первый из наиболее распространённых методов – метод Ройсса. В его основе лежит предположение о том, что напряжённое состояние частицы в каждой точке совпадает с напряжённым состоянием конгломерата [55], [56]:

$$\sigma_{jk} = \sigma_{jk}^i \quad (2.14)$$

При этом деформации конгломерата связаны с напряжениями системой уравнений:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{a_{11}} & \overline{a_{12}} & \overline{a_{13}} & 0 & 0 & 0 \\ \overline{a_{21}} & \overline{a_{22}} & \overline{a_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ \overline{a_{31}} & \overline{a_{32}} & \overline{a_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{a_{44}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \overline{a_{55}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \overline{a_{66}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

где $\overline{a_{jk}}$ – осреднённые коэффициенты податливости.

Осредненные коэффициенты податливости вычислим, полагая разброс частиц равномерным в пределах углов поворота φ , θ , ψ , как математические ожидания [55], [56]:

$$\overline{a_{jk}} = \frac{1}{6\pi^3} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} a_{jk}^i d\varphi d\psi d\theta \quad (2.16)$$

Второй из методов – метод Фойгта. В его основе лежит предположение о том, что деформации частицы совпадают с деформациями конгломерата [55], [56]:

$$\varepsilon_{jk} = \varepsilon_{jk}^i \quad (2.17)$$

При этом связь между напряжённым и деформированным состоянием конгломерата частиц запишем в виде уравнения:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{A_{11}} & \overline{A_{12}} & \overline{A_{13}} & 0 & 0 & 0 \\ \overline{A_{21}} & \overline{A_{22}} & \overline{A_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ \overline{A_{31}} & \overline{A_{32}} & \overline{A_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{A_{44}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \overline{A_{55}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \overline{A_{66}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

где $\overline{A_{jk}}$ – осреднённые коэффициенты упругости.

Осредненные коэффициенты упругости вычислим, полагая разброс частиц равномерным в пределах углов поворота φ , θ , ψ , как математические ожидания [55], [56]:

$$\overline{A_{jk}} = \frac{1}{6\pi^3} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} A_{jk}^i d\varphi d\psi d\theta \quad (2.19)$$

Вычисления выполним с использованием значений упругих постоянных по таблицам 2.3, 2.4. Расчёт проведён в программе *Maple* 2015. Результаты вычислений представлены в таблицах 2.7, 2.8.

Таблица 2.7 – Осреднённые коэффициенты матрицы податливости
(осреднение Ройсса), 10^{-4} МПа

Порода	$a_{11} = a_{22} = a_{33}$	$a_{12} = a_{13} = a_{23} = a_{21}$ $= a_{31} = a_{32}$	$a_{44} = a_{55} = a_{66}$
Ель	29,7406	-9,8719	79,2251
Сосна	17,6386	-5,7542	46,7856
Берёза	8,8968	-2,5710	22,9356
Ясень	6,4232	-2,5591	17,9647
Бук	4,6842	-1,3517	12,0717
Дуб	5,8230	-1,7193	15,0879

Таблица 2.8 – Осреднённые коэффициенты матрицы упругости
(осреднение Фойгта), МПа

Порода	$A_{11} = A_{22} = A_{33}$	$A_{12} = A_{13} = A_{23} =$ $A_{21} = A_{31} = A_{32}$	$A_{44} = A_{55} = A_{66}$
Ель	502	249	126
Сосна	829	401	214
Берёза	1469	597	436
Ясень	3296	2183	557
Бук	2787	1130	828
Дуб	2282	956	663

Осреднённые технические упругие постоянные вычисляются либо с использованием коэффициентов по таблице 2.7 и формул (2.3), либо с использованием коэффициентов по таблице 2.8 и формул (2.6), (2.3) (результаты вычислений полностью совпадают).

Таблица 2.9 – Осреднённые технические упругие постоянные
конгломерата частиц древесины

Порода	$E_{11} = E_{22} = E_{33},$ МПа	$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = \nu_{21}$ $= \nu_{31} = \nu_{32}$	$G_{12} = G_{13} = G_{23},$ МПа
Ель	336	0,33	126
Сосна	567	0,33	214
Берёза	1124	0,29	436
Ясень	1557	0,40	557
Бук	2135	0,29	828
Дуб	1717	0,30	663

Отметим, что, помимо равенства значений модулей между собой и коэффициентов Пуассона, а также физических коэффициентов податливости и жёсткости, для конгломерата во всех случаях выполняется классическое условие изотропии [38]:

$$E = \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)} G \quad (2.20)$$

Ввиду этого, конгломерат древесных частиц в дальнейшем будем считать изотропным, индексы, указывающие направление «бывших» осей упругой симметрии, в дальнейшем опустим.

Следует учесть, что оценки упругих постоянных получены для конгломератов с плотностью цельной древесины (поскольку при расчёте осреднённых значений упругих постоянных использованы значения упругих постоянных цельной древесины).

Сопоставим осреднённые технические упругие постоянные конгломерата частиц древесины различных пород с плотностью древесины. Данные о плотности древесины по [63] представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Плотность древесины при влажности 10-12 % [63]

Порода	Плотность, кг/м ³
Ель	445
Сосна	505
Береза	640
Ясень	680
Бук	700
Дуб	690

Данные таблиц 2.9 и 2.10 сопоставлены на графиках, представленных на рисунках 2.5, 2.6.

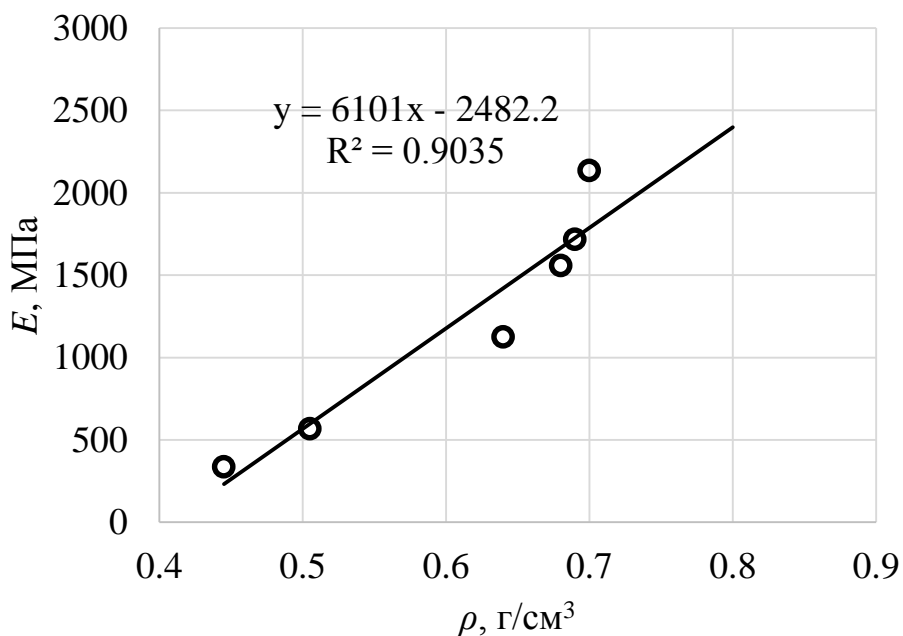


Рисунок 2.5 – Зависимость осреднённого модуля упругости конгломерата древесных частиц от плотности цельной древесины

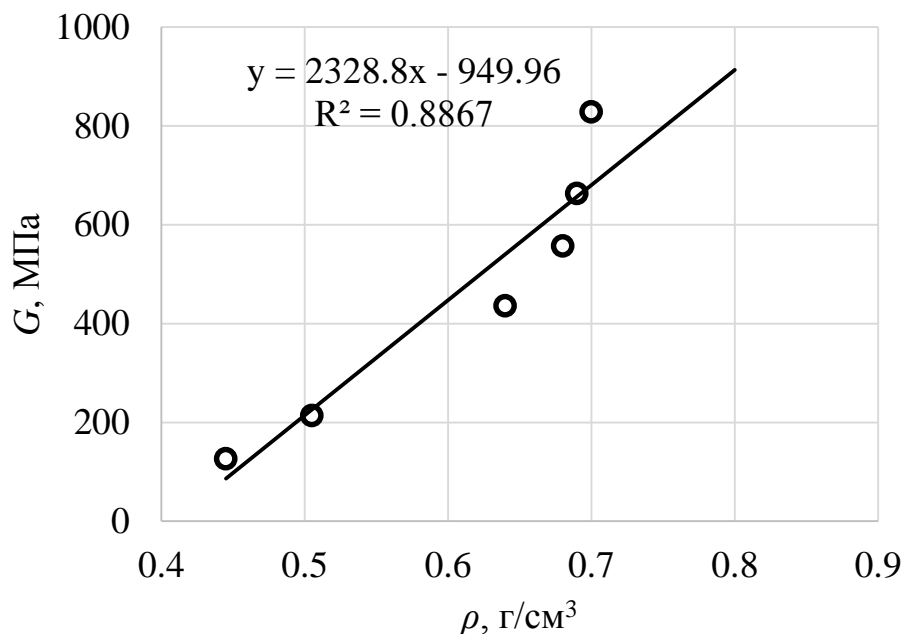


Рисунок 2.6 – Зависимость осреднённого модуля сдвига конгломерата древесных частиц от плотности цельной древесины

Данные, представленные на графиках, с удовлетворительной точностью аппроксимируются линейными функциями:

$$E = 6101\rho - 2482,2 \quad (2.21)$$

$$G = 2328,8\rho - 949,96 \quad (2.22)$$

Коэффициент Пуассона менее чувствителен к изменению плотности конгломерата (см. таблицу 2.9). Выражение для коэффициента получим, подставив формулы (2.21), (2.22) в формулу (2.20) – результаты расчёта представлены графиком на рисунке 2.7.

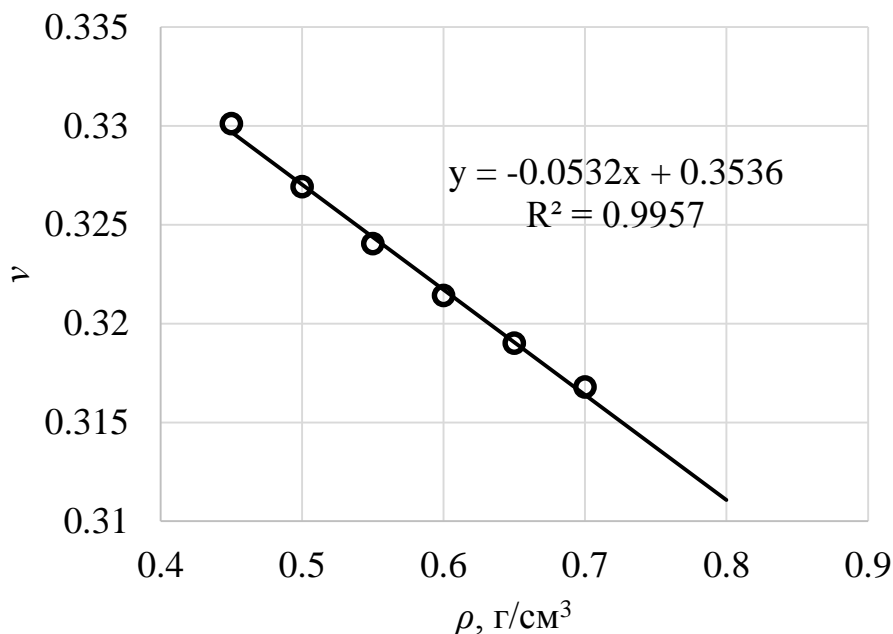


Рисунок 2.7 – Коэффициент Пуассона конгломерата древесных частиц в зависимости от плотности

Аппроксимируем данные, представленные на графике, линейной функцией:

$$\nu = -0,0532\rho + 0,3536 \quad (2.23)$$

В разделе 2.1.2 проиллюстрирована связь справочных данных о модулях упругости и пределах прочности древесины при сжатии. Обобщив эти данные, предположим зависимость величин, представленную графиком на рисунке 2.8. Зависимость получена при допущении о том, что предел прочности при сжатии функционально связан с модулем упругости, причём характер связи не зависит от направления волокон древесины.

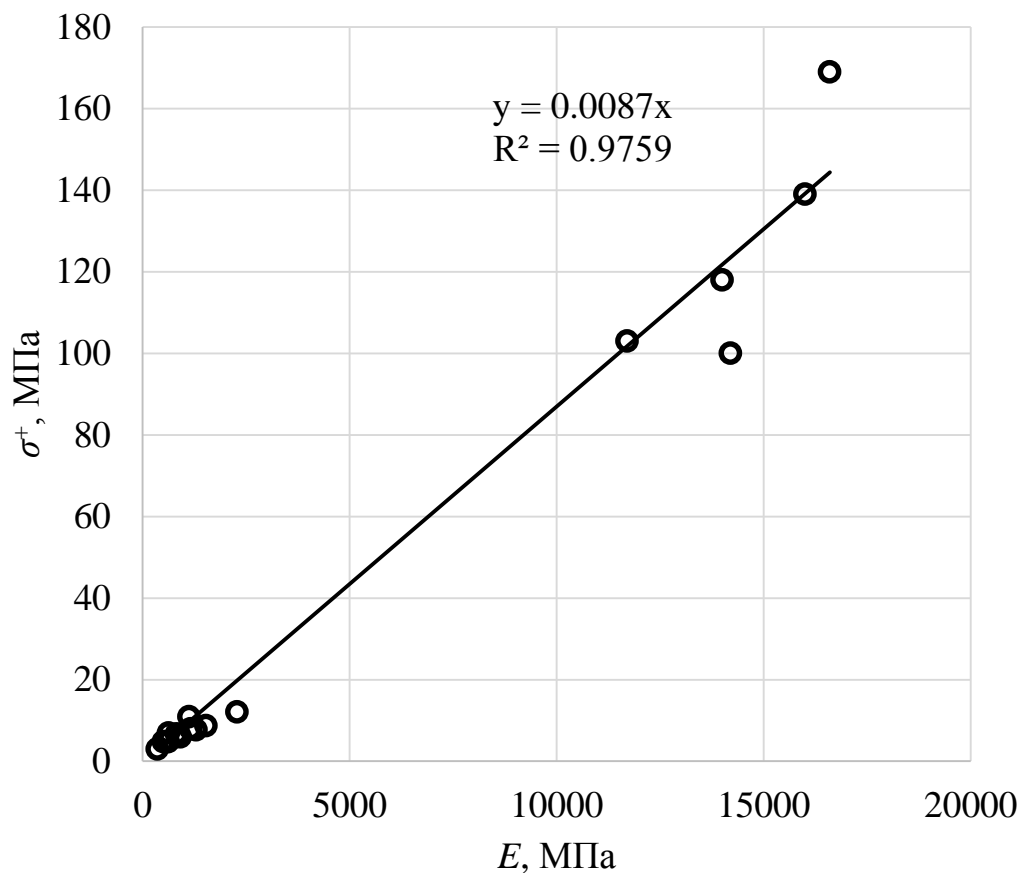


Рисунок 2.8 – Обобщённая взаимосвязь предела прочности при сжатии от модуля упругости древесины

Аппроксимируем данные, представленные на рисунке, линейной функцией:

$$\sigma^+ = 0,0087E \quad (2.24)$$

Если дополнительно предположим, что связь предела прочности на сжатие и модуля упругости у цельной древесины и у конгломерата древесных частиц подобна, то, с учётом формул (2.21), (2.23), получим зависимость, представленную графиком на рисунке 2.9.

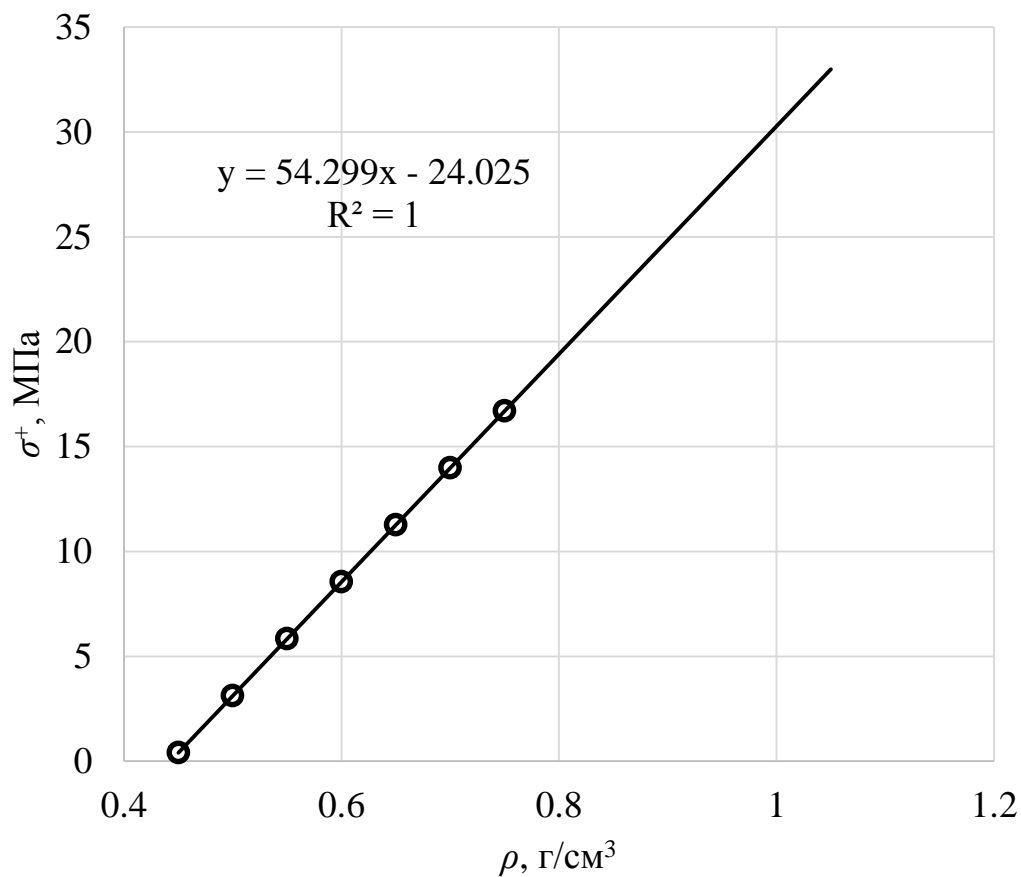


Рисунок 2.9 – Зависимость предела прочности при сжатии от плотности для конгломерата древесных частиц

Математическое выражение последней зависимости следующее:

$$\sigma^+ = 54,3\rho - 24,025 \quad (2.25)$$

2.2. Теоретическая оценка потребного давления прессования в зависимости от плотности брикета

Модуль упругой деформации и составляющую P_1 давления прессования, преодолевающую упругое сопротивление материала, свяжем следующей дифференциальной зависимостью:

$$\frac{dP_1}{d\varepsilon} = E \quad (2.26)$$

где ε – относительная деформация сжатия материала.

При прессовании измельченной древесной массы в закрытой матрице справедливо соотношение:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \varepsilon} \quad (2.27)$$

где ρ_0 – начальная плотность материала брикета.

Запишем уравнение (2.21) в общем виде:

$$E = a\rho + b \quad (2.28)$$

где a, b – числовые коэффициенты.

Тогда, после подстановки формул (2.27), (2.28) в уравнение (2.26) и интегрирования, запишем для P_1 :

$$P_1 = -a\rho_0 \varepsilon - a\rho_0 \ln(1 - \varepsilon) + b\varepsilon + C_1 \quad (2.29)$$

где C_1 – постоянная интегрирования, значение которой следует определить с учётом начального условия:

$$P(0) = 0 \quad (2.30)$$

Условие (2.30) соблюдается при значении C_1 :

$$C_1 = a\rho_0 i\pi \quad (2.31)$$

Тогда окончательно запишем для P_1 :

$$P_1 = -a\rho_0 \ln(1 - \varepsilon) + b\varepsilon \quad (2.32)$$

Составляющую P_2 давления прессования, затрачиваемую на преодоление сил бокового распора прессуемого материала, найдём по формуле:

$$P_2 = \nu P_1 \quad (2.33)$$

Запишем выражение (2.23) для коэффициента Пуассона в общем виде:

$$\nu = c\rho + d \quad (2.34)$$

где c, d – числовые коэффициенты.

Потребное давление прессования найдём как сумму составляющих P_1 и P_2 :

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.35)$$

Подставим в формулу (2.35) выражения (2.32) – (2.34), тогда:

$$P = \{-a\rho_0 \ln(1 - \varepsilon) + b\varepsilon\} \cdot \{1 + c\rho + d\} \quad (2.36)$$

Перепишем формулу (2.27) в следующем виде:

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \quad (2.37)$$

Окончательно, после подстановки выражения (2.37) в выражение (2.36), получим для потребного давления прессования формулу:

$$P = \left\{ -a\rho_0 \ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right) + b\frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right\} \cdot \{1 + c\rho + d\} \quad (2.38)$$

где числовые коэффициенты a, b, c, d определяются из формул (2.21), (2.23).

На рисунке 2.10 представлен пример расчёта потребного давления прессования по формуле (2.38) с использованием теоретических оценок коэффициентов a, b, c, d , полученных методом осреднения в предыдущем разделе.

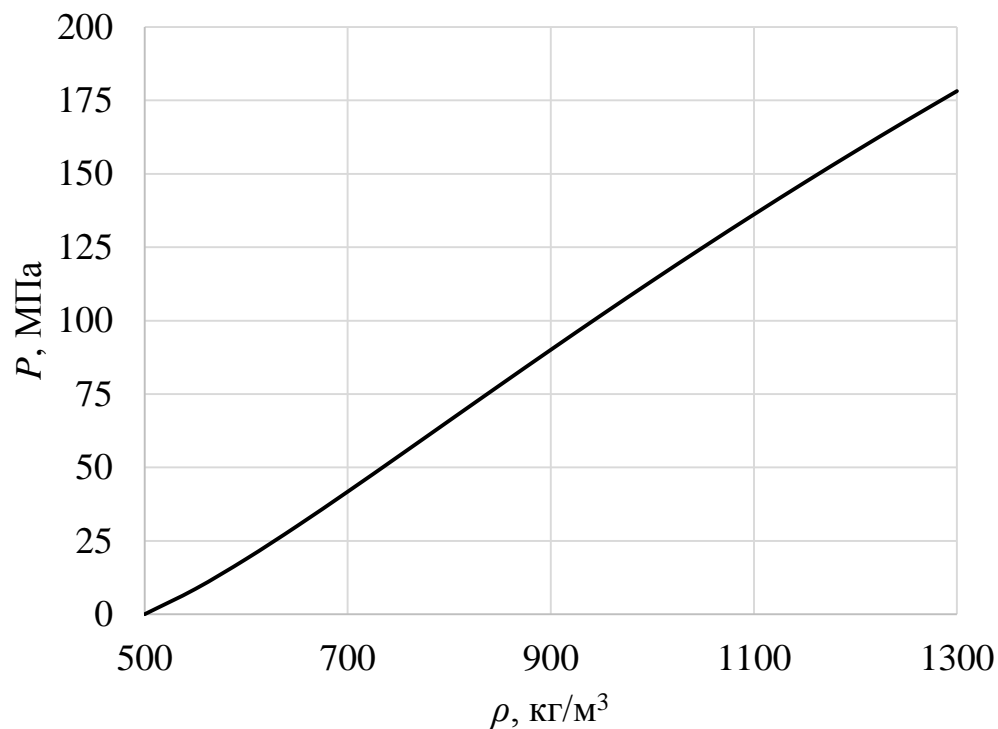


Рисунок 2.10 – Теоретическая оценка потребного давления прессования от плотности брикета

График показывает, что давление прессования, требующееся для получения брикета из измельченной древесины с плотностью 1200 – 1300 кг/м³ (1,2 – 1,3 г/см³) находится в пределах 150 – 175 МПа.

Основные результаты исследований, выполненных в настоящей главе, опубликованы нами в работе [65].

2.3. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

По результатам теоретических исследований, выполненных в настоящей главе, получены оценки упругих и деформативных свойств прессуемой древесной массы, представленной конгломератом древесных частиц, хаотически ориентированных в пространстве прессформы (ранее оценки определены численно только для случаев прессования частиц, хаотически ориентированных в плоскости, нормальной к направлению усилия прессования). Результаты исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Осредненные коэффициенты податливости, вычисленные как математические ожидания коэффициентов податливости при предположении о хаотическом разбросе частиц в всём пространстве прессформы и равенстве напряжений отдельных древесных частиц и их конгломерата (метод Ройсса), представлены в таблице 2.7.
2. Осредненные коэффициенты упругости, вычисленные как математические ожидания элементов матрицы упругости при предположении о хаотическом разбросе частиц в пространстве прессформы и равенстве деформаций отдельных древесных частиц и их конгломерата (метод Фойгта), представлены в таблице 2.8.
3. Осреднённые технические упругие постоянные, вычисленные с использованием коэффициентов по таблице 2.7 и формул (2.3), а также с использованием коэффициентов по таблице 2.8 и формул (2.6), (2.3), представлены в таблице 2.9.

4. Установлено равенство значений осреднённых модулей между собой, коэффициентов Пуассона, физических коэффициентов податливости и жёсткости. Показано, что для конгломерата древесных частиц, хаотически ориентированных в пространстве прессформы, во всех случаях выполняется классическое условие изотропии. Ввиду этого, конгломерат древесных частиц можно считать изотропным.
5. Зависимости осреднённого модуля упругости конгломерата древесных частиц, его модуля сдвига и коэффициента Пуассона от плотности конгломерата носят линейный характер и описываются формулами (2.21) – (2.23) соответственно.
6. Предел прочности конгломерата частиц при сжатии также связан с плотностью линейной зависимостью, формула (2.24).
7. С использованием осредненных значений упругих постоянных конгломерата древесных частиц теоретически установлено, что давление прессования, требующееся для получения брикета из измельченной древесины с плотностью $1200 - 1300 \text{ кг/м}^3$, находится в пределах $150 - 175 \text{ МПа}$.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Материалы и аппаратура, методика и план эксперимента

Целью экспериментальных исследований являлось:

- установить зависимость плотности брикетов ρ [кг/м³], получаемых в закрытой матрице гидравлического пресса от давления прессования P [МПа], добавки коры в прессуемую смесь ω [%], средней крупности сырья для брикетирования f [мм], влажности брикетируемого сырья W [%];
- установить зависимость прочности брикетов DU [%], получаемых в закрытой матрице гидравлического пресса от давления прессования P [МПа], добавки коры в прессуемую смесь ω [%], средней крупности сырья для брикетирования f [мм], влажности брикетируемого сырья W [%];

Управляемые экспериментальные факторы выбраны по результатам анализа состояния вопроса (глава 1).

Экспериментальным материалом служили смеси опилок древесины сосны и ели с добавками стружки этих же пород древесины, а также измельченной коры и отщепа.

Включение в смеси стружки и отщепа обусловлено необходимостью исследовать влияние средней крупности экспериментального сырья на целевые функции. Массовые доли опилок, стружки и отщепа рассчитывали, исходя из необходимости получить заданную среднюю крупность смеси, по формуле:

$$f = \frac{\sum w_j}{\sum \frac{w_j}{d_j}} \quad (3.1)$$

где w_j – массовая доля материала определенной фракции в смеси («узкий класс»), d_j – средние размеры частиц материала определенной фракции («узкого класса»), j – порядковый номер.

Кора, добавлявшаяся в экспериментальный материал, предварительно измельчалась при помощи промышленного измельчителя Erdwich M600/1-400, затем сепарировалась с использованием стандартной колонки сит.

Массы навесок контролировали при помощи товарных весов.

Давление прессования контролировалось при помощи контрольно-измерительной аппаратуры, входящей в комплектацию брикетного прессы RUF-600.

Для определения и контроля влажности экспериментального материала использован весовой метод.

Был использован план активного многофакторного эксперимента, эксперимент реализован по B -плану второго порядка [21], [59].

Число управляемых факторов K составляет 4. Величина плеча α^* определяется в зависимости от числа факторов, при числе основных факторов $K = 4$ $\alpha^* = 1,483$ [21], [59]. Число опытов рассчитано по формуле:

$$N = N_{\text{я}} + N_{\alpha} + N_0 \quad (3.2)$$

где $N_{\text{я}}$ – число опытов в ядре плана ($N_{\text{я}} = 2^K$, $N_{\text{я}} = 16$), N_{α} – число опытов в звездных точках ($N_{\alpha} = 2K$, $N_{\alpha} = 8$), N_0 – число опытов в центре плана (для ортогонального композиционного плана принимается $N_0 = 1$), всего 25 опытов.

Уровни варьирования управляемых факторов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Уровни варьирования управляемых факторов

Фактор	Кодированное обо- значение	Интервал	Уровни				
			Звездная точка	Нижний	Основной	Верхний	Звездная точка
			$-\alpha^*$	-1	0	+1	$+\alpha^*$
P , МПа	X_1	30	45	25	70	100	130
ω , %	X_2	12,5	5	25	37,5	50	70
f , мм	X_3	1,5	1,5	3	4,5	6	7,5
W , %	X_4	2,5	1	5	7,5	10	14

Таблица 3.2 – План эксперимента (кодированные переменные)

№ п/п	X_1	X_2	X_3	X_4
1	0	1,483	0	0
2	0	0	0	1,483
3	-1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	0	-1,483	0	0
6	1	1	-1	1
7	-1	-1	1	-1
8	1	-1	-1	1
9	0	0	0	0
10	-1	1	-1	-1
11	1	1	1	-1

№ п/п	X_1	X_2	X_3	X_4
12	0	0	-1,483	0
13	1	-1	1	1
14	1,483	0	0	0
15	-1	-1	-1	1
16	-1	1	1	1
17	1	-1	-1	-1
18	1	-1	1	-1
19	-1	1	-1	1
20	0	0	1,483	0
21	0	0	0	-1,483
22	-1	1	1	-1
23	1	1	1	1
24	-1,483	0	0	0
25	-1	-1	1	1

Таблица 3.3 – План эксперимента (натуральный масштаб)

№ п/п	P , МПа	ω , %	f , мм	W , %
1	100	70	4,5	7,5
2	100	37,5	4,5	14
3	70	25	3	5
4	130	50	3	5
5	100	5	4,5	7,5
6	130	50	3	10
7	70	25	6	5
8	130	25	3	10

№ п/п	P , МПа	ω , %	f , мм	W , %
9	100	37,5	4,5	7,5
10	70	50	3	5
11	130	50	6	5
12	100	37,5	1,5	7,5
13	130	25	6	10
14	175	37,5	4,5	7,5
15	70	25	3	10
16	70	50	6	10
17	130	25	3	5
18	130	25	6	5
19	70	50	3	10
20	100	37,5	7,5	7,5
21	100	37,5	4,5	1
22	70	50	6	5
23	130	50	6	10
24	25	37,5	4,5	7,5
25	70	25	6	10

Подготовленный экспериментальный материал брикетировали в производственных условиях с использованием гидравлического брикетного прессы RUF600 (рисунок 3.1, 3.2).



Рисунок 3.1 – Работа с контрольной и измерительной аппаратурой прессы RUF600



Рисунок 3.2 – Проведение экспериментов по брикетированию с использованием прессы RUF600

В случаях, когда брикет рассыпался при выходе из матрицы, плотность брикета условно принимали по перемещению пуансона прессы, зафиксированному на момент прекращения прессования. В этом случае фрагменты разрушенного брикета сепарировали, результаты сепарации использовали при расчёте прочности DU .

Готовые брикеты испытывали на прочность по методике [20]. Суть испытания заключается в том, что образец подвергают контролируемым ударам путем столкновения брикетов друг с другом и со стенками специальной вращающейся

камеры. Прочность рассчитывают исходя из массы образца, оставшегося после истирания и отделения тонких сломанных частиц.

Устройство для испытания брикетов представляет собой стальной барабан цилиндрической формы с номинальным объемом 160 л (рисунок 3.3), имеющий следующие размеры: внутренняя длина (или глубина) 598 ± 8 мм, внутренний диаметр 598 ± 8 мм.

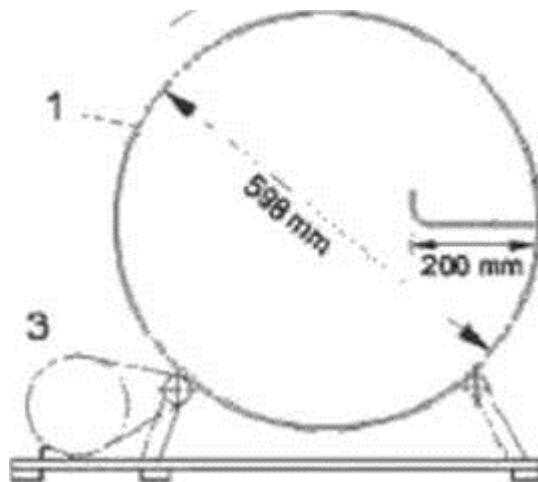


Рисунок 3.3 – Устройство для испытания брикетов на механическую прочность:

1 – барабан, 2 – перегородка, 3 – двигатель [20]

Барабан выполнен из стального листа толщиной 1 мм. Внутренняя поверхность барабана гладкая, без рёбер и борозд. Барабан для определения прочности оснащен прямоугольной стальной перегородкой, имеющей следующие размеры: длина: 598 ± 8 мм, высота 200 ± 2 мм; толщина 1 мм.

Перегородка приварена по всей длине ко всей внутренней высоте изогнутой поверхности барабана, параллельно оси барабана и перпендикулярно касательной кривой. Край перегородки плавно изогнут так, чтобы он был перпендикулярен к самой перегородке.

Барабан может открываться с одного из концов, крышка изготовлена из стального листа толщиной 1 мм и закреплена четырьмя вращающимися болтами на внешней части барабана.

Барабан способен вращаться со скоростью $(21 \pm 0,1)$ оборотов в минуту от электродвигателя с помощью шкивов, к барабану подключен счетчик вращения.

Сито из металлической проволочной сетки выбрано по ГОСТ Р 51568-99 так, чтобы размер ячейки сита составлял $2/3$ от диагонали брикета.

Весы выбраны по ГОСТ Р 53228 с точностью взвешивания до 0,1 г.

Проба, используемая для определения механической прочности, отобрана по ГОСТ Р 54217 и ГОСТ Р 54212.

Пробу делили на две части. На одной из частей, массой 5 кг, проводили определение содержания массовой доли влаги; на другой, массой $(5 \cdot 4 \text{ кг}) = 20 \text{ кг}$, - определяли механическую прочность. Массовую долю влаги определяли на непросеянном образце по ГОСТ Р 54186 и ГОСТ Р 54192 одновременно с определением прочности.

Минимальная часть порции для испытаний составляла 2 кг.

Навеску, массой не менее $(2 \pm 0,1)$ кг, помещали в барабан для определения прочности. Вращали образец со скоростью $(21 \pm 0,1)$ оборотов в минуту в течение 5 минут или совершали $(105 \pm 0,5)$ вращений.

Затем образец просеивали через сито. Сито выбирали по ГОСТ Р 51568-99 из ряда от 16 мм до 45 мм. Рассев осуществляли механическим способом полностью.

Образец, оставшийся на сите, взвешивали. Далее вычисляли процент целых брикетов (частиц, оставшихся на сите). Механическую прочность брикетов рассчитывали по формуле:

$$DU = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

где m_A – масса предварительно просеянных брикетов перед помещением их в барабан для определения прочности, m_E – масса просеянных брикетов после их извлечения из барабана.

3.2. Методика обработки экспериментальных данных

Методики обработки опытных данных составлена на основе [13], [21], [23], [30], [59], [70].

Средние значения опытных величин рассчитываются по известной формуле среднего арифметического:

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{ji} \quad (3.4)$$

где Y – исследуемая величина (прочность брикета либо давление прессования), n – число наблюдений в опыте, j – номер опыта, i – номер наблюдения.

Для расчёта выборочной дисперсии используется формула:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_j - Y_{ji})^2 \quad (3.5)$$

Выборочное среднеквадратическое отклонение исследуемой величины рассчитаем по формуле:

$$S_j = \sqrt{S_j^2} \quad (3.6)$$

Для проверки результатов наблюдений в опытах на наличие аномальных значений воспользуемся t -критерием:

$$t_{Y_{ji}} = \frac{|Y_{ji} - \bar{Y}_j|}{S_j} \quad (3.7)$$

Выборка не содержит аномальных значений при выполнении условия:

$$t_{Y_{ji}} \leq t(\alpha, n-1) \quad (3.8)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента, α – уровень значимости (0,05).

Для проверки достаточности числа наблюдений вначале рассчитаем коэффициенты вариации отдельно по опытам:

$$v_j = \frac{S_j}{Y_j} \quad (3.9)$$

Достаточное число наблюдений рассчитаем по формуле:

$$[n_j] = \frac{t^2 v_j^2}{\alpha^2} \quad (3.10)$$

Для проверки воспроизводимости опытов воспользуемся критерием Кохрена. Расчётное значение критерия Кохрена определим по формуле:

$$G = \frac{\max\{S_j^2\}}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \quad (3.11)$$

Критическое значение критерия Кохрена находится по формуле:

$$G_{KP} = \left\{ 1 + \frac{N-1}{F\left(\frac{\alpha}{N}, n-1, (N-1) \cdot (n-1)\right)} \right\}^{-1} \quad (3.12)$$

где F – табличное значение F -распределения, N – число опытов.

Опыты следует признать воспроизводимыми при соблюдении условия:

$$G \leq G_{KP} \quad (3.13)$$

После проверки результатов опытов на наличие аномальных значений и воспроизводимости перейдём к составлению математических моделей для расчёта прочности брикетов и плотности брикетов.

Общий вид математической модели для плотности и прочности брикетов:

$$\begin{aligned} Y = & a_0 + a_1 P + a_2 \omega + a_3 f + a_4 W + \\ & + a_5 P\omega + a_6 Pf + a_7 PW + a_8 \omega f + a_9 \omega W + a_{10} fW + \\ & + a_{11} P\omega f + a_{12} P\omega W + a_{13} PfW + a_{14} P\omega fW + \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$+ a_{15}P^2 + a_{16}\omega^2 + a_{17}f^2 + a_{18}W^2$$

где a_j – коэффициенты регрессионных моделей.

Составим матрицу из значений управляемых факторов в опытах:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \omega_1 & f_1 & \dots & W_1^2 \\ 1 & \rho_2 & \omega_2 & f_2 & \dots & W_2^2 \\ 1 & \rho_3 & \omega_3 & f_3 & \dots & W_3^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \rho_N & \omega_N & f_N & \dots & W_N^2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

В обоих случаях (и для прочности, и для давления прессования) размер матрицы \mathbf{X} составит 25x19.

Составим также вектор \mathbf{Y} из 25 средних значений исследуемой величины:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \overline{Y}_1 \\ \overline{Y}_2 \\ \overline{Y}_3 \\ \dots \\ \overline{Y}_N \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Обозначим \mathbf{a} вектор коэффициентов при факторах, входящих в математическую модель:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Вектор \mathbf{a} получим при помощи следующей формулы:

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (3.18)$$

Дополнительно введём матрицу \mathbf{Z} :

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \quad (3.19)$$

и вектор \mathbf{e} разностей расчётных и экспериментальных значений исследуемой величины:

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_1 - Y_1 \\ \bar{Y}_2 - Y_2 \\ \bar{Y}_3 - Y_3 \\ \dots \\ \bar{Y}_N - Y_N \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Вычислим несмещённую оценку дисперсии исследуемой величины в опытах:

$$S^2 = \frac{\mathbf{e}^T \mathbf{e}}{N - k} \quad (3.21)$$

где k – число коэффициентов математической модели.

Располагая значением несмещённой оценки дисперсии S^2 , оценим дисперсии коэффициентов математической модели по формуле:

$$S_{a_j} = S \sqrt{Z_{jj}} \quad (3.22)$$

Значимость коэффициента регрессии определим при помощи t -критерия:

$$t_{a_j} = \frac{a_j}{S_{a_j}} \quad (3.23)$$

Коэффициенты с t -критериями, меньшими табличного, следует последовательно исключать из математической модели, при этом расчёт по формулам (3.15) – (3.23) следует повторить с учётом исключения факторов из математической модели.

Доверительные интервалы для коэффициентов регрессии рассчитаем по формуле:

$$\Delta_j = S_{a_j} t \quad (3.24)$$

После исключения незначимых факторов оценим сходимость опытных и расчётных данных при помощи коэффициента детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}{\sum_{j=1}^N (\bar{Y} - Y_j)^2} \quad (3.25)$$

где \bar{Y} - вспомогательная величина, рассчитываемая по формуле:

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_j \quad (3.26)$$

Адекватность математической модели оценим при помощи F -распределения:

$$F = \frac{R^2(N-k)}{(1-R^2)(k-1)} \quad (3.27)$$

Математическая модель признаётся адекватной при соблюдении условия:

$$F \geq F(\alpha, N-k, k-1) \quad (3.28)$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты экспериментов

по определению плотности и прочности брикетов

Результаты экспериментов по определению плотности брикетов в зависимости от давления прессования P [МПа], добавки коры в прессуемую смесь ω [%], средней крупности сырья для брикетирования f [мм], влажности брикетируемого сырья W [%], проведённых в соответствии с методикой главы 3, представлены в таблице 4.1 и в приложении II.

Таблица 4.1 – Результаты экспериментов по определению плотности брикетов

P , МПа	ω , %	f , мм	W , %	ρ , кг/м ³	S^2	S	ν
100	70	4,5	7,5	1068	870	29,4958	2,76
100	37,5	4,5	14	976	2080	45,607	4,67
70	25	3	5	696	330	18,1659	2,61
130	50	3	5	1116	1530	39,1152	3,50
100	5	4,5	7,5	792	370	19,2354	2,42
130	50	3	10	1232	7120	84,3801	6,85
70	25	6	5	626	430	20,7364	3,31
130	25	3	10	1088	770	27,7489	2,55
100	37,5	4,5	7,5	892	320	17,8885	2,01
70	50	3	5	774	1030	32,0936	4,15

P , МПа	ω , %	f , мм	W , %	ρ , кг/м ³	S^2	S	ν
130	50	6	5	1086	530	23,0217	2,12
100	37,5	1,5	7,5	1012	770	27,7489	2,74
130	25	6	10	942	970	31,1448	3,30
175	37,5	4,5	7,5	1288	1220	34,9285	2,71
70	25	3	10	768	1670	40,8656	5,33
70	50	6	10	726	1180	34,3511	4,74
130	25	3	5	988	170	13,0384	1,32
130	25	6	5	898	470	21,6795	2,42
70	50	3	10	876	330	18,1659	2,08
100	37,5	7,5	7,5	768	670	25,8844	3,37
100	37,5	4,5	1	804	530	23,0217	2,86
70	50	6	5	674	530	23,0217	3,41
130	50	6	10	1100	1550	39,37	3,58
25	37,5	4,5	7,5	472	520	22,8035	4,83
70	25	6	10	654	330	18,1659	2,78

В таблице 4.2 и в приложении III представлены результаты экспериментов по определению прочности брикетов в зависимости от давления прессования P [МПа], добавки коры в прессуемую смесь ω [%], средней крупности сырья для брикетирования f [мм], влажности брикетируемого сырья W [%], проведённых в соответствии с методикой главы 3.

Таблица 4.2 – Результаты экспериментов по определению прочности брикетов

P , МПа	ω , %	f , мм	W , %	DU , %	S^2	S	ν
100	70	4,5	7,5	54,664	1,0523	1,0258	1,88
100	37,5	4,5	14	46,752	1,6569	1,2872	2,75

P , МПа	ω , %	f , мм	W , %	DU , %	S^2	S	ν
70	25	3	5	13,612	0,0706	0,2657	1,95
130	50	3	5	67,994	1,9984	1,4136	2,08
100	5	4,5	7,5	27,674	0,6315	0,7947	2,87
130	50	3	10	92,864	18,0227	4,2453	4,57
70	25	6	5	6,554	0,0211	0,1452	2,22
130	25	3	10	76,934	7,5961	2,7561	3,58
100	37,5	4,5	7,5	34,336	0,8583	0,9265	2,70
70	50	3	5	17,156	0,6178	0,786	4,58
130	50	6	5	55,202	2,5093	1,5841	2,87
100	37,5	1,5	7,5	50,486	2,9677	1,7227	3,41
130	25	6	10	47,666	1,2373	1,1124	2,33
175	37,5	4,5	7,5	101,082	7,402	2,7207	2,69
70	25	3	10	24,692	0,4042	0,6357	2,57
70	50	6	10	14,288	0,1555	0,3943	2,76
130	25	3	5	53,566	2,8298	1,6822	3,14
130	25	6	5	39,398	2,1219	1,4567	3,70
70	50	3	10	29,830	1,0026	1,0013	3,36
100	37,5	7,5	7,5	20,366	0,0432	0,2078	1,02
100	37,5	4,5	1	18,870	0,1279	0,3576	1,90
70	50	6	5	10,568	0,1867	0,4321	4,09
130	50	6	10	63,906	3,1602	1,7777	2,78
25	37,5	4,5	7,5	0,616	0,0004	0,0207	3,36
70	25	6	10	10,450	0,0313	0,1771	1,69

Расчётные значения критерия Кохрена в опытах по определению плотности брикетов и их прочности составляют 0,2708 и 0,3178 соответственно, что меньше критического значения. Таким образом, опыты можем считать воспроизводимыми.

Первоначально математические модели для плотности [кг/м³] и прочности [%] брикетов получены при помощи метода наименьших квадратов в виде уравнений со структурой формулы (3.14).

Для математических моделей выполнена оценка значимости коэффициентов, результаты проверки представлены в таблицах 4.3, 4.4.

Таблица 4.3 – Результаты оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии для плотности брикетов

Коэффициент	Z_{jj}	S_{aj}	a_j	t_{aj}	Δ_{aj}
a_0	226,4782	170208,2	354735,4	2,084127	416484,4
a_1, P	0,014791	1375,498	4804,162	3,492671	3365,722
a_2, ω	0,166687	4617,618	231,9563	0,050233	11298,9
a_3, f	7,221844	30394,24	26003,39	0,855537	74372,02
a_4, W	2,267173	17029,8	-2235,51	0,131271	41670,42
a_5, Pf	1,2E-05	39,25189	-18,8	0,478958	96,04592
$a_6, P\omega$	0,000309	198,6986	-533,333	2,684133	486,1979
a_7, PW	0,000111	119,2191	186,6667	1,565744	291,7187
$a_8, \omega f$	0,005531	841,1312	-1782,22	2,11884	2058,174
$a_9, \omega W$	0,001991	504,6787	381,3333	0,755596	1234,904
a_{10}, fW	0,044444	2384,383	-1600	0,671033	5834,374
$a_{11}, P\omega f$	3,75E-07	6,928856	23,28889	3,361145	16,9543
$a_{12}, P\omega W$	1,35E-07	4,157313	0,106667	0,025658	10,17258
$a_{13}, \omega fW$	6E-05	87,64386	33,77778	0,385398	214,4568

Коэффициент	Z_{jj}	S_{aj}	a_j	t_{aj}	Δ_{aj}
$a_{14}, P\omega fW$	3,16E-09	0,635835	-1,03111	1,621664	1,555833
a_{15}, P^2	4,07E-08	2,280749	-1,30882	0,573855	5,580792
a_{16}, ω^2	1,14E-06	12,0883	40,49099	3,3496	29,57902
a_{17}, f^2	0,016875	1469,244	184,8088	0,125785	3595,111
a_{18}, W^2	0,000714	302,2076	65,52916	0,216835	739,4754

Таблица 4.4 – Результаты оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии для прочности брикетов

Коэффициент	Z_{jj}	S_{aj}	a_j	t_{aj}	Δ_{aj}
a_0	226,4782	54,01161	-14,6279	0,27083	132,1617
a_1, P	0,014791	0,436482	-0,00479	0,010977	1,068034
a_2, ω	0,166687	1,465294	-0,14114	0,09632	3,585445
a_3, f	7,221844	9,644906	6,058941	0,628201	23,60024
a_4, W	2,267173	5,404012	3,173986	0,587339	13,22314
a_5, Pf	1,2E-05	0,012456	-0,00058	0,04619	0,030478
$a_6, P\omega$	0,000309	0,063052	-0,06848	1,086046	0,154284
a_7, PW	0,000111	0,037831	0,0269	0,711049	0,09257
$a_8, \omega f$	0,005531	0,266913	-0,14568	0,545778	0,653114
$a_9, \omega W$	0,001991	0,160148	-0,0691	0,431467	0,391868
a_{10}, fW	0,044444	0,756629	-0,64827	0,856783	1,851403
$a_{11}, P\omega f$	3,75E-07	0,002199	0,001769	0,804512	0,00538
$a_{12}, P\omega W$	1,35E-07	0,001319	0,000928	0,703644	0,003228
$a_{13}, \omega fW$	6E-05	0,027812	0,016076	0,578045	0,068053
$a_{14}, P\omega fW$	3,16E-09	0,000202	-0,0002	0,984191	0,000494
a_{15}, P^2	4,07E-08	0,000724	0,002757	3,809845	0,001771

Коэффициент	Z_{jj}	S_{aj}	a_j	t_{aj}	Δ_{aj}
a_{16}, ω^2	1,14E-06	0,003836	0,005493	2,451941	0,009386
a_{17}, f^2	0,016875	0,466231	0,033093	0,07098	1,140825
a_{18}, W^2	0,000714	0,095899	-0,0605	0,630889	0,234655

Расчётные значения t -критериев для коэффициентов a_j сравним с табличным значением t -критерия. При уровне значимости $p = 0,05$ и числе степеней свободы $N - k = 6$ табличное значение t -критерия составляет 2,4469. Таким образом, в таблице 4.3 признаем значимыми коэффициенты a_1, a_6, a_{11}, a_{16} , в таблице 4.4 – a_{15}, a_{16} . Прочие коэффициенты из уравнений исключим.

Составим уравнения регрессии повторно, причём:

$$\rho = b_0 P + b_1 P \omega + b_2 P \omega f + b_3 \omega^2 \quad (4.1)$$

$$DU = b_0 P^2 + b_1 \omega^2 \quad (4.2)$$

Результаты оценки коэффициентов регрессии и их доверительных интервалов в уравнении (4.1) представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Коэффициенты и доверительные интервалы их изменения в уравнении регрессии для оценки плотности брикетов (после исключения незначимых факторов)

Коэффициент	b_j	Δ_{bj}
b_0, P	8,181277	1,275988
$b_1, P \omega$	0,067485	0,041121
$b_2, P \omega f$	-0,01095	0,009277
b_3, ω^2	0,136509	0,051632

Математическую модель для оценки плотности брикетов запишем в следующем виде:

$$\rho = 8,18P + 0,0675P\omega - 0,0109P\omega f + 0,137\omega^2 \quad (4.3)$$

Коэффициент детерминации математической модели (4.3) составляет $R^2 = 0,8645$, расчётное значение критерия Фишера $F = 44,6609$ ($F_{\text{крит}} = 3,0725$). Таким образом, считаем сходимость расчётных и экспериментальных значений плотности брикета удовлетворительной (рисунок 4.1), а математическую модель (4.3) адекватной.

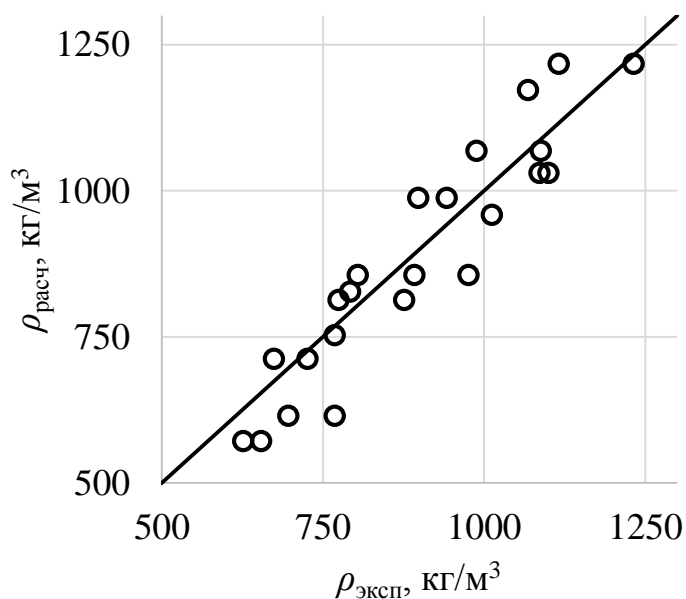


Рисунок 4.1 – Сопоставление экспериментальных и расчётных значений плотности брикетов

С учётом доверительных интервалов изменения коэффициентов (таблица 4.5), можем записать уравнение для плотности брикета в следующем виде:

$$\rho = (8,18 \pm 1,28)P + (0,0675 \pm 0,0411)P\omega + \quad (4.4)$$

$$+ (-0,0109 \pm 0,00928)P\omega f + (0,137 \pm 0,0516)\omega^2$$

Результаты оценки коэффициентов регрессии и их доверительных интервалов в уравнении (4.2) представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Коэффициенты и доверительные интервалы их изменения в уравнении регрессии для оценки прочности брикетов (после исключения незначимых факторов)

Коэффициент	b_j	Δ_{b_j}
b_0, P^2	0,0032102	0,000557539
b_1, ω^2	0,003321146	0,003149761

Математическую модель для оценки прочности брикетов запишем в следующем виде:

$$DU = 0,00321P^2 + 0,00332\omega^2 \quad (4.5)$$

Коэффициент детерминации математической модели (4.5) составляет $R^2 = 0,8090$, расчётное значение критерия Фишера $F = 97,3918$ ($F_{\text{крит}} = 4,2793$). Таким образом, считаем сходимость расчётных и экспериментальных значений прочности брикета удовлетворительной (рисунок 4.2), а математическую модель (4.5) адекватной.

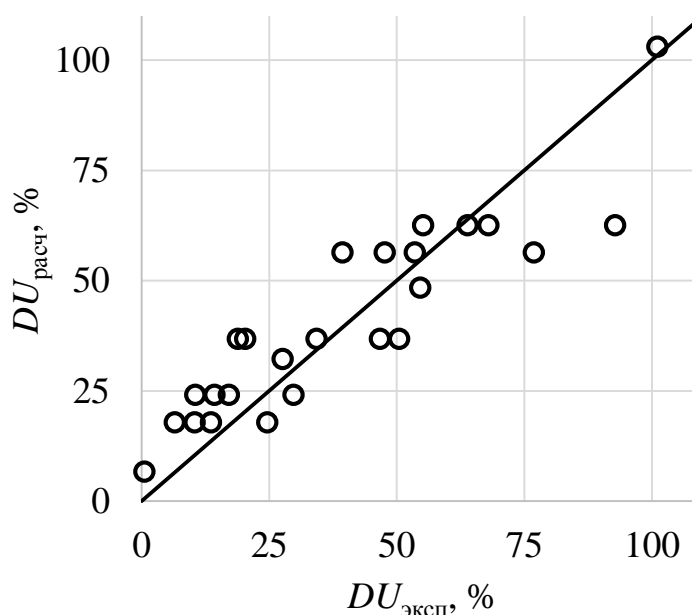


Рисунок 4.2 – Сопоставление экспериментальных и расчётных значений прочности брикетов

С учётом доверительных интервалов изменения коэффициентов (таблица 4.6), можем записать уравнение для плотности брикета в следующем виде:

$$DU = (0,00321 \pm 0,0005575)P^2 + (0,00332 \pm 0,003150)\omega^2 \quad (4.6)$$

Модели (4.3) и (4.5) проиллюстрированы графиками на рисунках 4.3 – 4.6.

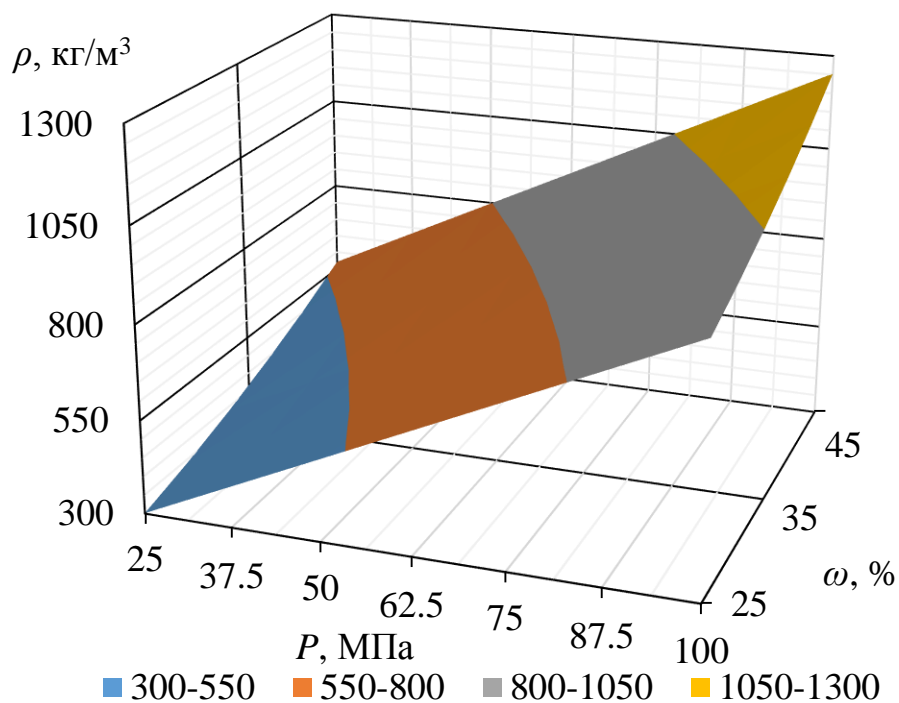


Рисунок 4.3 – Влияние давления прессования и массовой доли коры в смеси на плотность брикета ($f = 4,5$ мм)

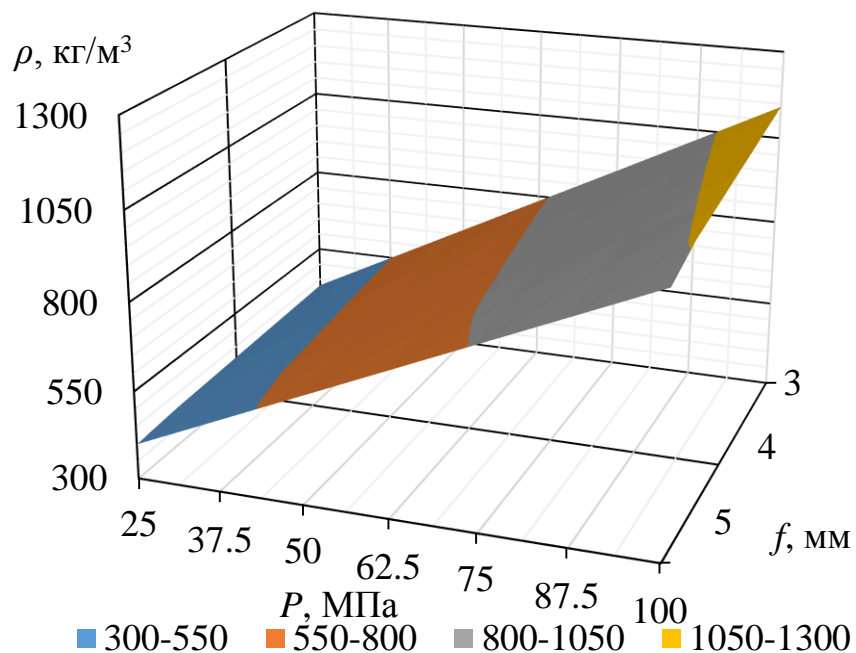


Рисунок 4.4 – Влияние давления прессования и средней фракции смеси на плотность брикета ($\omega = 37,5\%$)

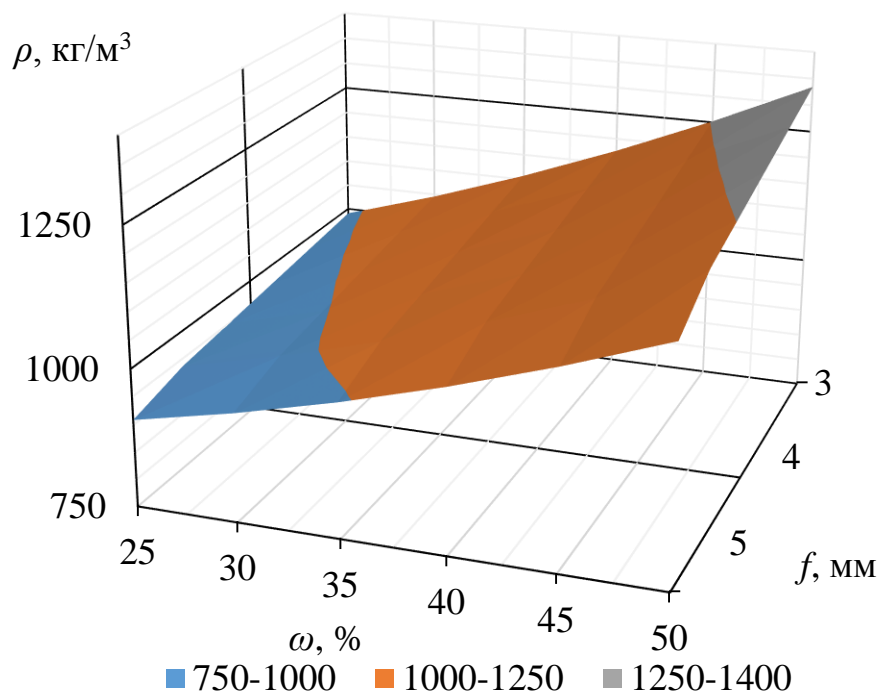


Рисунок 4.5 – Влияние массовой доли коры и средней фракции смеси на плотность брикета ($P = 100$ МПа)

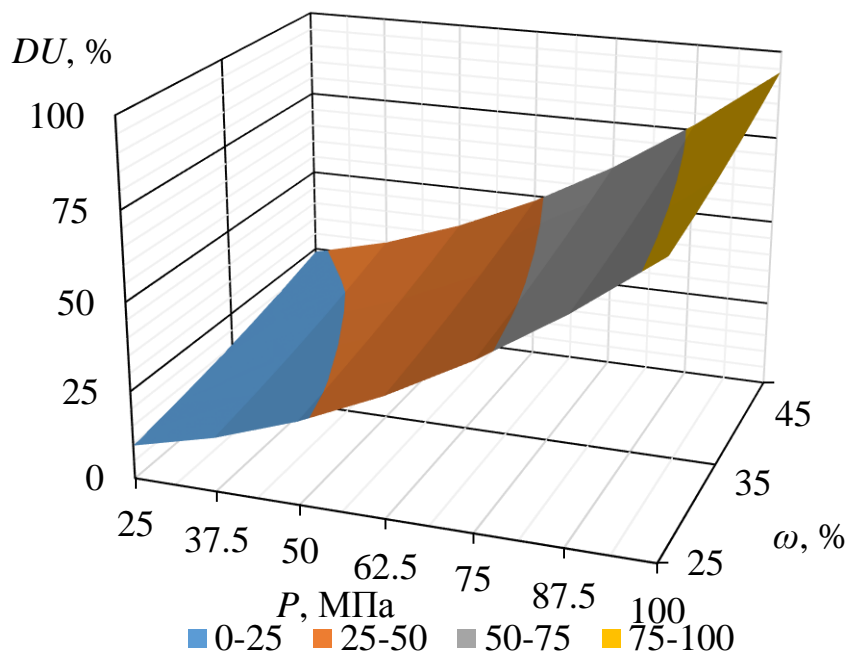


Рисунок 4.6 – Влияние давления прессования и массовой доли коры в смеси на прочность брикета

Основные результаты проведенных экспериментов опубликованы в нашей статье [67].

4.2. Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований

Сопоставим результаты теоретических и экспериментальных исследований. Теоретическую оценку потребного давления прессования получим по формуле (2.38). Экспериментальную оценку давления прессования получим, выразив давление P по формуле (4.3) через плотность (в примере примем $f = 5$ мм, $\omega = 0$ %).

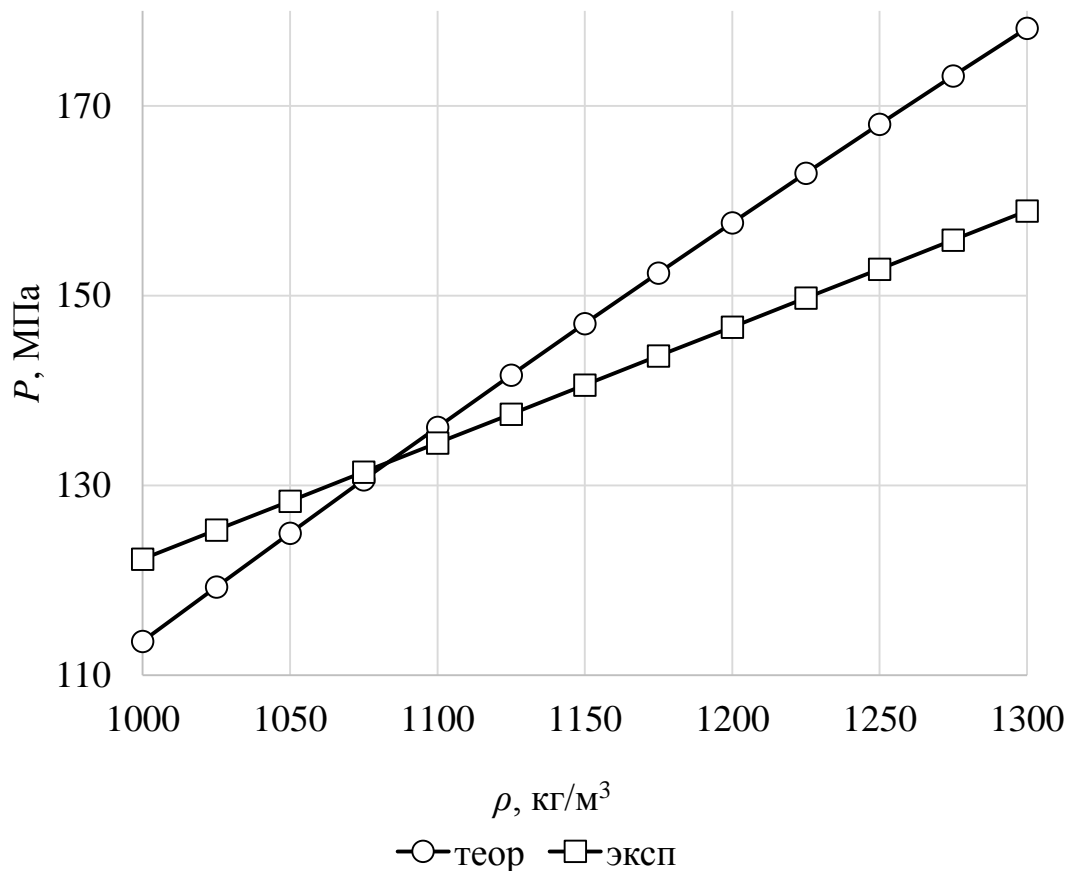


Рисунок 4.7 – Теоретическая и экспериментальная оценка потребного давления прессования в зависимости от плотности брикета из опилок

Графики показывают, что отличие теоретической оценки давления прессования от экспериментальной составляют 10 – 20 МПа, около 10 – 15 %.

На рисунке 4.8 представлены результаты сопоставления теоретических и экспериментальных данных, пунктирными линиями показаны доверительные границы экспериментальной оценки давления прессования, полученные по формуле (4.4), в которой учтены интервалы изменения коэффициентов регрессионной модели.

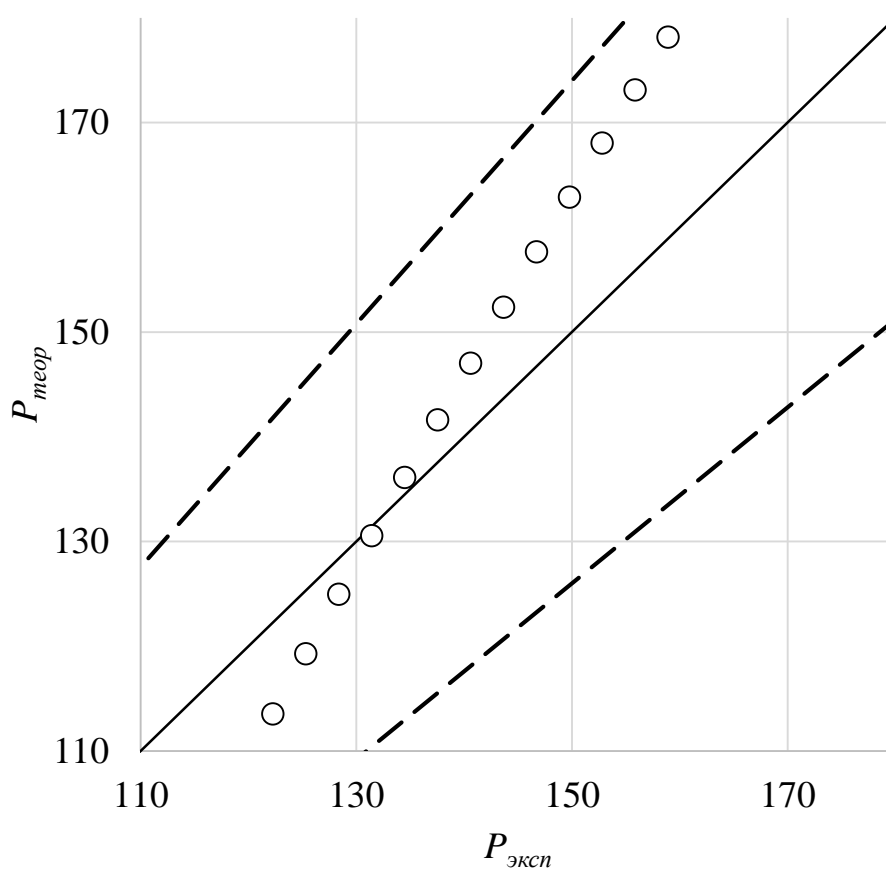


Рисунок 4.8 – Сравнение теоретической и экспериментальной оценки
потребного давления прессования от плотности брикета из опилок

Как видно из графика, отклонение теоретической оценки давления прессования от экспериментального значения находится в пределах, заданных доверительными интервалами изменения коэффициентов регрессионной модели. Таким образом, полагаем сходимость теоретических и экспериментальных данных удовлетворительной.

4.3. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Расчётные значения критерия Кохрена в опытах по определению плотности брикетов и их прочности составляют 0,2708 и 0,3178 соответственно, что меньше критического значения. Таким образом, опыты можем считать воспроизводимыми.
2. Плотность брикетов при прессовании зависит от давления прессования, массовой доли добавки коры и крупности прессуемых частиц. Регрессионная модель представлена уравнением (4.3). Коэффициент детерминации математической модели (4.3) составляет $R^2 = 0,8645$, расчётное значение критерия Фишера $F = 44,6609$ ($F_{\text{крит}} = 3,0725$). Таким образом, считаем сходимость расчётных и экспериментальных значений плотности брикета удовлетворительной (рисунок 4.1), а математическую модель (4.3) адекватной. Доверительные интервалы изменения коэффициентов в уравнении регрессии для оценки плотности брикетов представлены в таблице 4.5.
3. Прочность брикетов зависит от давления прессования и массовой доли добавки коры. Математическая модель для оценки прочности брикетов представлена формулой (4.5). Коэффициент детерминации математической модели (4.5) составляет $R^2 = 0,8090$, расчётное значение критерия Фишера $F = 97,3918$ ($F_{\text{крит}} = 4,2793$). Таким образом, считаем сходимость расчётных и экспериментальных значений прочности брикета удовлетворительной (рисунок 4.2), а математическую модель (4.5) адекватной. Доверительные интервалы изменения коэффициентов в уравнении регрессии для оценки прочности брикетов представлены в таблице 4.6.

4. По результатам сопоставления данных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что отличие теоретической оценки давления прессования от экспериментальной составляет 10 – 20 МПа (в процентном отношении – около 10 – 15 %), причём отклонение теоретической оценки давления прессования от экспериментального значения находится в пределах, заданных доверительными интервалами изменения коэффициентов регрессионной модели. Таким образом, полагаем сходимость теоретических и экспериментальных данных удовлетворительной.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

По результатам теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в диссертационной работе, получены следующие результаты и сделаны следующие выводы:

1. В соответствии с действующим европейским стандартом, топливные брикеты должны иметь плотность свыше 1 г/см^3 , влажность до 15 % и зольность в пределах 0,7 – 3 %, допускается содержание в брикетах коры. С учётом ограничения по влажности, теплотворная способность брикетов не ниже требуемой стандартом. Технические требования к биотопливу, разработанные в России, в целом, настаивают на схожих характеристиках топливных брикетов.
2. Осредненные коэффициенты податливости, вычисленные как математические ожидания коэффициентов податливости при предположении о хаотическом разбросе частиц в всём пространстве прессформы и равенстве напряжений отдельных древесных частиц и их конгломерата (метод Ройсса), представлены в таблице 2.7. Осредненные коэффициенты упругости, вычисленные как математические ожидания элементов матрицы упругости при предположении о равенстве деформаций отдельных древесных частиц и их конгломерата (метод Фойгта), представлены в таблице 2.8. Осреднённые технические упругие постоянные, вычисленные с использованием коэффициентов по таблице 2.7 и формул (2.3), а также с использованием коэффициентов по таблице 2.8 и формул (2.6), (2.3), представлены в таблице 2.9.

3. Установлено равенство значений осреднённых модулей между собой, коэффициентов Пуассона, физических коэффициентов податливости и жёсткости. Показано, что для конгломерата древесных частиц, хаотически ориентированных в пространстве прессформы, выполняется условие изотропии. Ввиду этого, конгломерат древесных частиц можно считать изотропным.
4. Зависимости осреднённого модуля упругости конгломерата древесных частиц, его модуля сдвига и коэффициента Пуассона от плотности конгломерата носят линейный характер и описываются формулами (2.21) – (2.23) соответственно.
5. С использованием осреднённых значений упругих постоянных конгломерата древесных частиц теоретически установлено, что давление прессования, требующееся для получения брикета из измельченной древесины с плотностью 1200 – 1300 кг/м³, находится в пределах 150 – 175 МПа. Этот диапазон давления прессования и следует рекомендовать для брикетирования.
6. Плотность брикетов при прессовании зависит от давления прессования, массовой доли добавки коры и крупности прессуемых частиц. Регрессионная модель представлена уравнением (4.3). Коэффициент детерминации математической модели (4.3) составляет $R^2 = 0,8645$, расчётное значение критерия Фишера $F = 44,6609$ ($F_{\text{крит}} = 3,0725$). Таким образом, считаем сходимость расчётных и экспериментальных значений плотности брикета удовлетворительной (рисунок 4.1), а математическую модель (4.3) адекватной. Доверительные интервалы изменения коэффициентов в уравнении регрессии для оценки плотности брикетов представлены в таблице 4.5.

7. Прочность брикетов зависит от давления прессования и массовой доли добавки коры. Математическая модель для оценки прочности брикетов представлена формулой (4.5). Коэффициент детерминации математической модели (4.5) составляет $R^2 = 0,8090$, расчётное значение критерия Фишера $F = 97,3918$ ($F_{\text{крит}} = 4,2793$). Таким образом, считаем сходимость расчётных и экспериментальных значений прочности брикета удовлетворительной (рисунок 4.2), а математическую модель (4.5) адекватной. Доверительные интервалы изменения коэффициентов в уравнении регрессии для оценки прочности брикетов представлены в таблице 4.6.
8. По результатам сопоставления данных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что отличие теоретической оценки давления прессования от экспериментальной составляет 10 – 20 МПа (в процентном отношении – около 10 – 15 %), причём отклонение теоретической оценки давления прессования от экспериментального значения находится в пределах, заданных доверительными интервалами изменения коэффициентов регрессионной модели. Таким образом, полагаем сходимость теоретических и экспериментальных данных удовлетворительной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акимова Т.А., Кузьмин А.П., Хаскин В.В. Экология. Природа-Человек-Техника: Рек. М-вом образования РФ в качестве учебника для студ. вузов. М.: Экономика, 2007. -510 с.
2. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов: Учебник для ВУЗов. - 2-е изд., испр. - М. : Высш. шк., 2000. - 560 с.
3. Анохин Н.Н. Строительная механика в примерах и задачах ч. II. – М.: Издательство Ассоциации строительных ВУЗов, 2007. – 464 с.
4. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978. -222 с.
5. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов: Справочник. Л.: Машиностроение, 1980. -247 с.
6. Бажанов Е.А. Брикетирование древесных отходов. Деревообрабатывающая промышленность. -1996. - N 4. - С. 16 - 18.
7. Бастриков Д.В., Чибирев О.В., Кацадзе В.А., Локштанов Б.М., Ползиков А.Н. Брикетирование древесных отходов. Актуальные проблемы развития лесного комплекса материалы Международной научно-технической конференции. Министерство образования и науки РФ; Правительство Вологодской области; Департамент лесного комплекса Вологодской области; Вологодский государственный университет. 2016. С. 102-105.
8. Бастриков Д.В., Чибирев О.В., Власов Ю.Н. Зависимость механических свойств коры сосны и ели от влажности. Леса России: политика, промышленность, наука, образование материалы научно-технической конференции. Под. ред. В.М. Гедьо. - 2016. - С. 37-40.

9. Бит Ю.А. Древесные отходы - биотопливо. Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса. - С. 9 - 14.
10. Булатов И.А. Разработка процесса прессового гранулирования мелкодисперсных сред на примере минеральных порошков и древесных отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 25 с.
11. Веретенник Д.Г. Использование древесной коры в народном хозяйстве. М.: Лесная промышленность, 1976. -120 с.
12. Вигдорович А.И., Сагалаев Г.В., Поздняков А.А. Древесные композиционные материалы в машиностроении: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. -240 с.
13. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практ. по стат. мет. и исслед. операций с исп. пакетов STATISTICA и EXCEL: Уч. пос - М.: Инфра-М, 2013. - 464 с.
14. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1966. - 576 с.
15. Гарин В.М., Кленова И.А., Колесников В.И. Экология для технических вузов: учебник - Изд. 2-е. - Ростов н/Д: Феникс, 2001. – 382 с.
16. Гильфанов М.Ф., Башкиров В.Н., Герке Л.Н., Грачёв А.Н. Экспериментально-теоретическое исследование процесса получения топливных брикетов из отходов деревообрабатывающей промышленности. Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 6. С. 218-224.
17. Гомонай М.В. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы. - М.: Изд-во МГУЛ, 2006. -68 с
18. Гомонай М.В. Производство древесного твердого биотоплива на предприятиях лесного комплекса. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 2-1 (7-1). С. 207-209.

- 19.ГОСТ Р 55115-2012 (EN 14961-3:2011) Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива. Часть 3. Древесные брикеты для промышленного использования.
- 20.ГОСТ 34090.1-2017 (ISO 17831-1:2015) Биотопливо твердое. Определение механической прочности пеллет и брикетов. Часть 2. Брикеты.
- 21.Гуров С.В. Планирование и статистическая обработка результатов экспериментов. Методические указания. - С-Пб.:ЛТА. - 31с.
- 22.Елишевич А.Т. Брикетирование полезных ископаемых. – Киев; Одесса: Лыбиды, 1990. – 296 с.
- 23.Ефимова М.Р. Общая теория статистики: Учебник - М.: ИНФРА-М, 2011. - 416 с.
- 24.Зарецкий Ю.К. Теория консолидации. – М.: Наука, 1967. – 268 с.
- 25.Ильюшенко Д.А. Разработка технологии производства брикетов из отходов окорки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова. Санкт-Петербург, 2012. 20 с.
- 26.Ильюшенко Д.А. Разработка технологии производства брикетов из отходов окорки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С.М. Кирова. Санкт-Петербург, 2012. 135 с.
- 27.Ильюшенко Д.А., Власов Ю.Н., Кучер В.С. Экспериментальные исследования динамического (ударного) воздействия на кору сосны. В сборнике: Леса России: политика, промышленность, наука, образование материалы научно-технической конференции. Под. ред. В.М. Гедьо. 2016. С. 170-173.
- 28.Ильюшенко Д.А., Власов Ю.Н., Кучер С.В. Динамические нагрузки при уплотнении древесных материалов. В сборнике: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА Материалы Второй Всероссийской

- научно-практической конференции с международным участием, посвященной 65-летию высшего лесного образования в Республике Карелия. 2016. С. 112-114.
29. Карминский В.Д., Колесников В.И., Жданов Ю.А., Гарин В.М. Экологические проблемы и энергосбережение. – М.: Маршрут, 2004. – 592 с.
30. Козлов А.Ю. Статистический анализ данных в MS Excel: - М.: ИНФРА-М, 2014. - 320 с.
31. Коробов В.В., Рушнов Н.П. Переработка низкокачественного древесного сырья (проблемы безотходной технологии). - М.: Экология, 1991. -288 с.
32. Коршак А.В. Обоснование технологии производства древесных брикетов на прессовом оборудовании ударного типа. Автореферат дисс. канд. техн. наук. СПб: СПбГЛТА, 2011. 20 С.
33. Коршак А.В. Устройство для изготовления древесных брикетов. Обоснование технологии производства древесных брикетов на прессовом оборудовании ударного типа. Дисс. канд. техн. наук. СПб: СПбГЛТА, 2011. 151 С.
34. Коршак А.В., Бирман А.Р., Онегин В.И., Хитров Е.Г. Брикетирование опилок на прессах ударного типа. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2011. № 197. С. 175-181.
35. Коршак А.В., Бирман А.Р., Хитров Е.Г., Коркка А.А., Селимов А.М. К вопросу повышения надежности оборудования лесоперерабатывающего комплекса. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. № 191. С. 144-151.
36. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. - 334 с
37. Куницкая О.А., Хитров Е.Г., Ильюшенко Д.А. Уплотнение древесных материалов под действием ударной нагрузки. Научное обозрение. 2012. № 4. С. 121-127.

- 38.Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 512 с.
- 39.Локштанов Б.М., Кацадзе В.А., Бастриков Д.В., Чиберев О.В. Брикетирование древесных отходов. В сборнике: Актуальные проблемы развития лесного комплекса Материалы Международной научно-технической конференции. Министерство образования и науки РФ, Правительство Вологодской области, Вологодский государственный университет, Департамент лесного комплекса Вологодской области. 2015. С. 121-123.
- 40.Любов В.К. Биоэнергетика – перспективное направление развития лесных регионов. Журнал Леспромформ. - 2016. - №7. – С.174-176.
- 41.Любов В. К. и др. Исследование технологического процесса производства древесного гранулированного топлива и эффективности его энергетического использования. Теплофизика и энергетика: конференция с международным участием «VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике»: Сборник докладов. – Екатеринбург, 2013. – С. 350–357.
- 42.Любов В.К. Совершенствование топливно-энергетического комплекса путем повышения эффективности сжигания топлив и вовлечения в энергетический баланс отходов переработки биомассы и местного топлива: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.14.04. -Архангельск, 2004. -44 с.
- 43.Михайлов Г.М. Вторичные материальные ресурсы лесной и деревообрабатывающей промышленности (образование и использование): Справочник. М.: Экономика, 1983. -224 с.
- 44.Михайлов Г.М., Серов Н.А. Пути улучшения использования вторичного древесного сырья. - М.: Лесная промышленность, 1988. -224 с.
- 45.Модин Н.А., Ерошкин А.Н. Брикетирование измельченной древесины и древесной коры. - М.: Лесная промышленность, 1971. -112 с.

- 46.Модин Н.А. и др. Определение коэффициентов трения и распирающих усилий при прессовании измельченной древесины: Отчет НИР, отв. исп. Н.А. Модин. Л.: ЛТА, 1965. – 49 с.
- 47.Мюллер О.Д. Совершенствование технологии производства древесных гранул: автореферат д-ра ... техн. наук. Архангельск: САФУ, 2015. 31 С.
- 48.Мюллер О.Д., Малыгин В.И., Любов В.К. Влияние параметров технологического оборудования на качественные показатели древесных гранул. Лесн. журн. 2012. № 2. С. 33–43. (Изв. высш. учеб. заведений).
- 49.Мюллер О.Д., Мелехов В.И., Герасимчук Д.Л., Ключин Н.М., Тюрикова Т.В. Экспериментальное определение влияния на модуль Юнга давления прессования древесной гранулы. ИВУЗ. «Лесной журнал» № 3, 2015. С. 69-76.
- 50.Мюллер О.Д., Мелехов В.И., Пономарева Н.Г., Тюрикова Т.В. Влияние относительной длины фильеры матрицы на давление прессования термомодифицированной березовой коры в пресс-грануляторах валкового типа. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 5 (359). С. 110-118.
- 51.Мюллер О.Д., Мелехов В.И., Пономарева Н.Г., Тюрикова Т.В., Хрусталева М.О. Математическая модель процесса прессования термомодифицированной древесной коры в пресс-грануляторах барабанного типа. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 2 (356). С. 130-148.
- 52.Никишов В. Д. Комплексное использование древесины - М.: Лесная промышленность, 1985. -264 с.
- 53.Николаева Л.А., Попов С.Н., Буренина О.Н., Соловьев Т.М. Утилизация отходов деревоперерабатывающих предприятий Республики Саха (Якутия) в топливные брикеты // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №6 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/64TVN617.pdf>

- 54.Плотников Ю.Г. Матрицы в строительной механике. Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2008 г. – 141 с.
- 55.Поздняков А.А. Прочность и упругость композиционных древесных материалов. - М.: Лесная промышленность, 1988. -136 с.
- 56.Поздняков А.А. Упругие постоянные древесностружечной плиты как квазиизотропного материала. Лесной журнал / Изв. ВУЗов. – 1969. - № 5. – С. 71-76
- 57.Попов А.Н., Любов В.К., Мюллер О.Д., Попова Е.И. Тензометрические исследования процесса прессования древесных гранул на грануляторе с плоской матрицей. Вестник Череповецкого государственного университета №8, 2015. С. 14-18.
- 58.Ракитова О.С., Овсянко А.Д., Александрова С.Е. Древесная топливная гранула в России и СНГ: Справочник. - СПб, 2005. -124 с.
- 59.Рогов В.А., Поздняк Г.Г. Методика и практика технических экспериментов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 288 с.
- 60.Свиткин М.З., Щедро Д.А. Технология изготовления изделий из измельченной древесины. М.: Лесная промышленность, 1976. -144 с
- 61.Скорикова Д.А. Обоснование состава топливных гранул и технологии подготовки древесных опилок для их производства. Дисс. канд. техн. наук. Йошкар-Ола: ПовГТУ, 2012. 236 С.
- 62.Трошин А.Г., Моисеев В.Ф., Тельнов И.А., Завинский С.И. Развитие процессов и оборудования для производства топливных брикетов из биомассы. Восточно-Европейский журнал передовых технологий - 2010. - № 3/8 (45). - С. 36 - 40.
- 63.Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Изд-во МГУЛ, 2002. -340 с

64. Чибирев О.В., Власов Ю.Н., Бастриков Д.В. Аппроксимированные зависимости для расчета теплотворной способности коры по абсолютной влажности. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2016. Т. 4. № 1 (21). С. 108-111.
65. Чибирев О.В., Власов Ю.Н., Кучер С.В. Оценка упругих свойств конгломерата древесных частиц. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. № 219. С. 120-130.
66. Чибирев О.В., Кацадзе В.А. Изменение модуля деформации опилок и коры при уплотнении. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 2-2 (13-2). С. 372-375.
67. Чибирев О.В., Куницкая О.А., Ильюшенко Д.А. Экспериментальные исследования прессования опилок древесины сосны на гидравлическом прессе. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. № 217. С. 120-130.
68. Шведов А.И. Классификация путей и способов утилизации лесосечных отходов. Известия вузов. Лесной журнал. -1995. - № 2 - 3. - С. 54 - 57.
69. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. – М.: Наука, 1977. – 400 с.
70. Шумак О.А. Статистика - М.: Инфра-М, 2012. - 311 с.
71. Ahiduzzamn M. Rice Husk Energy Technologies in Bangladesh. Bangladesh Rice Research Institute, Gazipur, Bangladesh. Agricultural Engineering International, 2007. pp. 24 – 31.
72. Aina O.M, Adetogun A.C, Iyiola Kolade. Heat energy from value-added sawdust briquettes of Albizia Zygia. Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management, №2, 2009.

73. Arun K. Tripathi, P.V.R. Iyer and Tara Chandra Kandpal. Techno-economic evaluation of biomass briquetting in India. *Biomass and bio energy*, volume 14, issue 5-6, 1998. pp. 479-488.
74. Bhattacharya S., Bhatia R., Shah N., Islam M. Densified biomass in Thailand: Potential, status and problems. *Biomass*, №8, 1985. pp. 255- 266.
75. Boukis I., Vassilakos N., Kontopulos G., Karellas S. Policy plan for the use of biomass and biofuels in Greece, Part I: Available biomass and methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, №13, 2009. pp. 971–985.
76. Cuiping L., Chuangzhi W., Yanyongjie Haitao H. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. *Biomass, Energy*, №27, 2004. pp. 119-130.
77. Ericsson E. Carbon accumulation and fossil fuel substitution during different rotation scenarios. *Scandinavian Journal of Forest Research*, №18, 2003. pp. 269-278.
78. Abbot G., Patrick D. Loworeb J. Characteristics and management potential of some indigenous firewood species in Malawi. *Forest Ecology and Management*, №119. 1999. pp. 111-121.
79. Gholipour Zanjani N., Zarringhalam Moghaddam A., Dorosti S. Physical and chemical properties of coal briquettes from biomass-bituminous blends. *Petroleum and Coal*, №56, 2014. pp. 188-195.
80. Gustavsson L. Reducing CO₂ emissions by substituting biomass for fossil fuels. *Energy*, №20, 1995. pp. 1097–1113.
81. Jenkins B., Baxter L., Miles T., Miles J. Combustion properties of biomass. *Fuel Process Technol*, №54, 1998. pp. 17-46.
82. Jha, Pushpa, Yadav, Pramod. Briquetting of Saw Dust. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 110-116., 2012. pp.
83. Kronbergs E. Mechanical strength testing of stalk materials and compacting energy evaluation. *Industrial Crops and Products*, №11, 2000, pp. 211-216.

84. Lehtikangas P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, №20, 2001. pp. 351-360.
85. Lindner M., Sohngen B., Joyce L., Price D., Bernier P., Karjalainen T. Integrated forestry assessments for climate change impacts. *Forestry Ecology and Management*, №162, 2002. pp. 117-136.
86. Mitchual, Stephen, Frimpong-Mensah, Kwasi, A. Darkwa, Nicholas. Evaluation of fuel properties of six tropical hardwood timber species for briquettes. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, №04, 2014. pp. 1-9.
87. Nikolaisen L., Nørgaard J., Hjuler K., Busk J., Junker H., Sander B. Quality characteristics of biofuel pellets. Aarhus: Danish Technological Institute, 2002. 38 p.
88. Nilsson D., Bernesson S., Hansson P. Pellet production from agricultural raw materials - A systems study. *Biomass and Bioenergy*, №35, 2011. pp. 679-689.
89. Obernberger I., Thek G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, №27, 2004. pp. 653-669.
90. Petersen R. A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy. *Biomass and Bioenergy*, №30, 2006. pp. 605-617.
91. Pham Khan Toan, Nguyen Duc Cuong, Nguyen Thi Quy and Phi Kim Sinh Application of briquetting technology to produce briquettes from agricultural residues and by products. *World Renewable Energy Congress VI*, 2000. pp. 1416-1419.
92. Rabier F., Temmerman M., Bohm T., Hartmann H., Daugbjerg P., Rathbauer, J. et al. Particle density determination of pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, №30, 2006. pp. 954-963.
93. Samuelsson R., Thyrel M., Sjöström M., Lestander T. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel Processing Technology*, №90, 2009. pp. 1129-1134.

94. Schmidt J., Leduc S., Dotzauer E., Kindermann G., Schmid E. Cost-effective CO₂ emission reduction through heat, power and biofuel production from woody biomass: A spatially explicit comparison of conversion technologies. *Applied Energy*, №10, 2007. pp. 2128–2141.
95. Schweizerische Normen-Vereinigung (SN). Testing of solid fuels - compressed untreated wood, requirements and testing (SN 166000), 2001. Winterthur: Schweizerische Normen-Vereinigung.
96. Sengar, Sandip, Mohod, Atul, Khandetod, Yashwant, Patil, Sharmila, D. Chendake, A. (2012). Performance of briquetting machine for briquette fuel. *International Journal of Energy Engineering*, №2, 2012. pp. 28-34.
97. Sikkema K., Steiner M., Junginger M., Hiegl W., Hansen M., Faaij A. The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, №5, 2013. pp. 250–278.
98. Stahl M., Granstrom K., Berghel J., Renstrom R. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. *Biomass and Bioenergy*, №27, 2004. pp. 621-628.
99. Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyzaniak M., Gulczynski P., Mleczek M. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. *Renewable Energy*, №57, 2013. pp. 20-26.
100. Takeshita T. A strategy for introducing modern bioenergy into developing Asia to avoid dangerous climate change. *Applied Energy*, №86, 2009. pp. 222–S232.
101. Temmermana M., Rabier F., Daugbjerg P., Hartmann H., Bohm T. Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, №30, 2006. pp. 964–972.

102. Tromborg E., Ranta T., Schweinle J., Soldberg B., Skjevrakd G., Tiffany D. Economic sustainability for wood pellets production – A comparative study between Finland, Germany, Norway, Sweden and the US. 2013. 60 p.
103. Yamada K., Sorimachi A., Wang Q., Yi J., Cheng S., Zhou Y., Sakamoto, K. Abatement of indoor air pollution achieved with coal–biomass household briquettes. Atmospheric Environment, №42, 2008. pp. 7924-7930.
104. Yoshida T., Suzuki H. Current Status of Woody Biomass Utilization in ASEAN Countries, Biomass Maggy Ndombo Benteke Momba, IntechOpen, 2010. DOI: 10.5772/9770.
105. <https://www.ruf-briquetter.com> [интернет-ресурс], дата обращения: 5.01.2018.

ПРИЛОЖЕНИЯ К РАБОТЕ

**Приложение I. Развёрнутые выражения для коэффициентов
матрицы податливости и упругости древесины
при смене системы координат**

Коэффициенты матрицы податливости:

$$ai_{1,1} := (a_{3,3} \sin(\theta)^4 + \cos(\theta)^2 (a_{5,5} + 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^4 a_{1,1}) \cos(\varphi)^4 + ((a_{1,2} + a_{2,3} + a_{4,4}) \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^2 (a_{6,6} + 2a_{1,2})) \sin(\varphi)^2 \cos(\varphi)^2 + a_{2,2} \sin(\varphi)^4$$

$$ai_{1,2} := \cos(\psi)^2 a_{1,2} (\cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2) \cos(\varphi)^4 + (-(-\cos(\theta)^4 a_{1,1} + (-a_{5,5} - 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 + a_{6,6}) \cos(\theta)^2 - a_{3,3} \sin(\theta)^4 + a_{4,4} \sin(\theta)^2 - a_{2,2}) \cos(\psi)^2 \sin(\varphi)^2 - \sin(\psi) \sin(\theta) \cos(\psi) ((-a_{5,5} + 2a_{1,1} - 2a_{1,3}) \cos(\theta)^2 + (a_{5,5} + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \sin(\theta)^2 + a_{4,4} - a_{6,6}) \cos(\theta) \sin(\varphi) - (-a_{1,3} \cos(\theta)^4 + \sin(\theta)^2 (a_{5,5} - a_{1,1} - a_{3,3}) \cos(\theta)^2 - \sin(\theta)^4 a_{1,3}) \sin(\psi)^2 \cos(\varphi)^2 + \sin(\varphi)^2 (\cos(\psi)^2 (\cos(\theta)^2 a_{1,2} + \sin(\theta)^2 a_{2,3}) \sin(\varphi)^2 - 2 \cos(\psi) \sin(\psi) \cos(\theta) \sin(\theta) (a_{1,2} - a_{2,3}) \sin(\varphi) + \sin(\psi)^2 (\cos(\theta)^2 a_{2,3} + \sin(\theta)^2 a_{1,2}))$$

$$ai_{1,3} := \sin(\psi)^2 a_{1,2} (\cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2) \cos(\varphi)^4 + (-(-\cos(\theta)^4 a_{1,1} + (-a_{5,5} - 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 + a_{6,6}) \cos(\theta)^2 - a_{3,3} \sin(\theta)^4 + a_{4,4} \sin(\theta)^2 - a_{2,2}) \sin(\psi)^2 \sin(\varphi)^2 + \sin(\psi) \sin(\theta) \cos(\psi) ((-a_{5,5} + 2a_{1,1} - 2a_{1,3}) \cos(\theta)^2 + (a_{5,5} + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \sin(\theta)^2 + a_{4,4} - a_{6,6}) \cos(\theta) \sin(\varphi) - (-a_{1,3} \cos(\theta)^4 + \sin(\theta)^2 (a_{5,5} - a_{1,1} - a_{3,3}) \cos(\theta)^2 - \sin(\theta)^4 a_{1,3}) \cos(\psi)^2 \cos(\varphi)^2 + \sin(\varphi)^2 (\sin(\psi)^2 (\cos(\theta)^2 a_{1,2} + \sin(\theta)^2 a_{2,3}) \sin(\varphi)^2 + 2 \cos(\psi) \sin(\psi) \cos(\theta) \sin(\theta) (a_{1,2} - a_{2,3}) \sin(\varphi) + \cos(\psi)^2 (\cos(\theta)^2 a_{2,3} + \sin(\theta)^2 a_{1,2}))$$

$$\begin{aligned}
ai_{2,2} := & \left((a_{3,3} \sin(\theta)^4 + \cos(\theta)^2 (a_{5,5} + 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^4 a_{1,1}) \sin(\varphi)^4 \right. \\
& + \left((a_{1,2} + a_{2,3} + a_{4,4}) \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^2 (a_{6,6} + 2a_{1,2}) \right) \sin(\varphi)^2 \cos(\varphi)^2 \\
& + \cos(\varphi)^4 a_{2,2}) \cos(\psi)^4 + 2 \sin(\psi) \sin(\varphi) \sin(\theta) \left((a_{5,5} - 2a_{1,1} + 2a_{1,3}) \cos(\theta)^2 \right. \\
& - (a_{5,5} + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \sin(\theta)^2) \sin(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^2 (a_{4,4} - a_{6,6} - a_{1,2} + a_{2,3}) \\
& \cos(\theta) \cos(\psi)^3 + \sin(\psi)^2 \left((a_{5,5} + 2a_{1,3}) \cos(\theta)^4 - 4 \sin(\theta)^2 \left(a_{5,5} - \frac{3}{2} a_{1,1} \right. \right. \\
& + 2a_{1,3} - \frac{3}{2} a_{3,3}) \cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^4 (a_{5,5} + 2a_{1,3}) \left. \left. \right) \sin(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^2 \left((a_{1,2} \right. \right. \\
& + a_{2,3} + a_{4,4}) \cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2 (a_{6,6} + 2a_{1,2}) \left. \left. \right) \cos(\psi)^2 - 2 \sin(\psi)^3 \left((a_{5,5} \right. \right. \\
& + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \cos(\theta)^2 - \sin(\theta)^2 (a_{5,5} - 2a_{1,1} + 2a_{1,3}) \left. \left. \right) \right. \\
& \sin(\varphi) \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\psi) + \sin(\psi)^4 \left(a_{3,3} \cos(\theta)^4 + \cos(\theta)^2 (a_{5,5} \right. \\
& + 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 + \sin(\theta)^4 a_{1,1} \left. \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
ai_{2,3} := & \left((\sin(\theta)^4 a_{1,3} - \sin(\theta)^2 (a_{5,5} - a_{1,1} - a_{3,3}) \cos(\theta)^2 + a_{1,3} \cos(\theta)^4) \sin(\varphi)^2 \right. \\
& + \cos(\varphi)^2 (\cos(\theta)^2 a_{2,3} + \sin(\theta)^2 a_{1,2}) \left. \right) \cos(\psi)^4 - \left((-a_{5,5} - 2a_{1,3} \right. \\
& + 2a_{3,3}) \sin(\theta)^2 + (a_{5,5} - 2a_{1,1} + 2a_{1,3}) \cos(\theta)^2) \sin(\varphi)^2 + (-a_{5,5} + 2a_{1,1} \\
& - 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 + (a_{5,5} + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \cos(\theta)^2 + \cos(\varphi)^2 (a_{4,4} - a_{6,6} - 2a_{1,2} \\
& + 2a_{2,3}) \left. \right) \sin(\psi) \sin(\varphi) \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\psi)^3 - \left((-a_{3,3} \sin(\theta)^4 - \cos(\theta)^2 (a_{5,5} \right. \\
& + 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 - \cos(\theta)^4 a_{1,1}) \sin(\varphi)^4 + (a_{5,5} \sin(\theta)^4 + ((-2a_{5,5} + 4a_{1,1} \\
& - 8a_{1,3} + 4a_{3,3}) \cos(\theta)^2 - \cos(\varphi)^2 (a_{1,2} + a_{2,3} + a_{4,4})) \sin(\theta)^2 + (a_{5,5} \cos(\theta)^2 \\
& - \cos(\varphi)^2 (a_{6,6} + 2a_{1,2})) \cos(\theta)^2) \sin(\varphi)^2 - \sin(\theta)^4 a_{1,1} + ((-a_{5,5} \\
& - 2a_{1,3}) \cos(\theta)^2 + a_{6,6} \cos(\varphi)^2) \sin(\theta)^2 + a_{4,4} \cos(\theta)^2 \cos(\varphi)^2 - a_{3,3} \cos(\theta)^4 \\
& - \cos(\varphi)^4 a_{2,2}) \sin(\psi)^2 \cos(\psi)^2 + \sin(\psi)^3 \sin(\varphi) \sin(\theta) \left(((-a_{5,5} - 2a_{1,3} \right. \\
& + 2a_{3,3}) \sin(\theta)^2 + (a_{5,5} - 2a_{1,1} + 2a_{1,3}) \cos(\theta)^2) \sin(\varphi)^2 + (-a_{5,5} + 2a_{1,1} \\
& - 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 + (a_{5,5} + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \cos(\theta)^2 + \cos(\varphi)^2 (a_{4,4} - a_{6,6}) \left. \right) \\
& \cos(\theta) \cos(\psi) - \sin(\psi)^4 \left((-a_{1,3} \cos(\theta)^4 + \sin(\theta)^2 (a_{5,5} - a_{1,1} - a_{3,3}) \cos(\theta)^2 \right. \\
& - \sin(\theta)^4 a_{1,3}) \sin(\varphi)^2 - \cos(\varphi)^2 a_{1,2} (\cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2) \left. \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
ai_{3,3} := & \left((a_{3,3} \sin(\theta)^4 + \cos(\theta)^2 (a_{5,5} + 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^4 a_{1,1}) \sin(\varphi)^4 \right. \\
& + \left((a_{1,2} + a_{2,3} + a_{4,4}) \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^2 (a_{6,6} + 2a_{1,2}) \right) \sin(\varphi)^2 \cos(\varphi)^2 \\
& + \cos(\varphi)^4 a_{2,2}) \sin(\psi)^4 - 2 \sin(\varphi) \sin(\theta) \left(\left((a_{5,5} - 2a_{1,1} + 2a_{1,3}) \cos(\theta)^2 - (a_{5,5} \right. \right. \\
& + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \sin(\theta)^2) \sin(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^2 (a_{4,4} - a_{6,6} - a_{1,2} + a_{2,3}) \left. \right) \\
& \cos(\psi) \cos(\theta) \sin(\psi)^3 + \sin(\psi)^2 \left(\left((a_{5,5} + 2a_{1,3}) \cos(\theta)^4 - 4 \sin(\theta)^2 (a_{5,5} \right. \right. \\
& - \frac{3}{2} a_{1,1} + 2a_{1,3} - \frac{3}{2} a_{3,3}) \cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^4 (a_{5,5} + 2a_{1,3}) \left. \right) \sin(\varphi)^2 \\
& + \cos(\varphi)^2 \left((a_{1,2} + a_{2,3} + a_{4,4}) \cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2 (a_{6,6} + 2a_{1,2}) \right) \left. \right) \cos(\psi)^2 \\
& + 2 \left((a_{5,5} + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \cos(\theta)^2 - \sin(\theta)^2 (a_{5,5} - 2a_{1,1} \right. \\
& + 2a_{1,3}) \left. \right) \sin(\varphi) \sin(\theta) \cos(\psi)^3 \cos(\theta) \sin(\psi) + \cos(\psi)^4 (a_{3,3} \cos(\theta)^4 \\
& + \cos(\theta)^2 (a_{5,5} + 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 + \sin(\theta)^4 a_{1,1})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
ai_{4,4} := & \left((a_{5,5} \cos(\theta)^4 - 2 \sin(\theta)^2 (a_{5,5} - 2a_{1,1} + 4a_{1,3} - 2a_{3,3}) \cos(\theta)^2 \right. \\
& \left. + a_{5,5} \sin(\theta)^4) \sin(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^2 (a_{4,4} \cos(\theta)^2 + a_{6,6} \sin(\theta)^2) \right) \cos(\psi)^4 \\
& - 4 \left((a_{5,5} - 2a_{1,1} + 2a_{1,3}) \cos(\theta)^2 - (a_{5,5} + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \sin(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 \\
& + (a_{5,5} + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \cos(\theta)^2 + (-a_{5,5} + 2a_{1,1} - 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 \\
& + \cos(\varphi)^2 (a_{4,4} - a_{6,6} - a_{1,2} + a_{2,3}) \sin(\psi) \sin(\varphi) \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\psi)^3 - 2 \left(\left(\right. \right. \\
& \left. \left. -2 \cos(\theta)^4 a_{1,1} - 2 \cos(\theta)^2 (a_{5,5} + 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 - 2a_{3,3} \sin(\theta)^4 \right) \sin(\varphi)^4 + \left((a_{5,5} \right. \right. \\
& \left. \left. + 4a_{1,3}) \cos(\theta)^4 + \left((-6a_{5,5} + 8a_{1,1} - 8a_{1,3} + 8a_{3,3}) \sin(\theta)^2 - 2 \cos(\varphi)^2 (a_{6,6} \right. \right. \\
& \left. \left. + 2a_{1,2}) \cos(\theta)^2 - 2 \left(\left(-\frac{1}{2} a_{5,5} - 2a_{1,3} \right) \sin(\theta)^2 + \cos(\varphi)^2 (a_{1,2} + a_{2,3} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. + a_{4,4}) \right) \sin(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 - 2a_{3,3} \cos(\theta)^4 + \left((-2a_{5,5} - 4a_{1,3}) \sin(\theta)^2 \right. \\
& \left. + \cos(\varphi)^2 (a_{4,4} + 2a_{1,2} + 2a_{2,3}) \right) \cos(\theta)^2 - 2 \sin(\theta)^4 a_{1,1} + \cos(\varphi)^2 (a_{6,6} \\
& \left. + 4a_{1,2}) \sin(\theta)^2 - 2 \cos(\varphi)^4 a_{2,2} \right) \sin(\psi)^2 \cos(\psi)^2 + 4 \left(\left((a_{5,5} - 2a_{1,1} \right. \right. \\
& \left. \left. + 2a_{1,3}) \cos(\theta)^2 - (a_{5,5} + 2a_{1,3} - 2a_{3,3}) \sin(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 + (a_{5,5} + 2a_{1,3} \right. \\
& \left. - 2a_{3,3}) \cos(\theta)^2 + (-a_{5,5} + 2a_{1,1} - 2a_{1,3}) \sin(\theta)^2 + \cos(\varphi)^2 (a_{4,4} - a_{6,6} - a_{1,2} \right. \\
& \left. + a_{2,3}) \right) \sin(\psi)^3 \sin(\varphi) \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\psi) + \left((a_{5,5} \cos(\theta)^4 - 2 \sin(\theta)^2 (a_{5,5} \right. \\
& \left. - 2a_{1,1} + 4a_{1,3} - 2a_{3,3}) \cos(\theta)^2 + a_{5,5} \sin(\theta)^4) \sin(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^2 (a_{4,4} \cos(\theta)^2 \right. \\
& \left. + a_{6,6} \sin(\theta)^2) \right) \sin(\psi)^4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
ai_{5,5} := & \sin(\psi)^2 (a_{4,4} \sin(\theta)^2 + a_{6,6} \cos(\theta)^2) \cos(\varphi)^4 + (-2 \sin(\psi)^2 (-2a_{3,3} \sin(\theta)^4 \\
& + \left((-2a_{5,5} - 4a_{1,3}) \cos(\theta)^2 + a_{4,4} + 2a_{1,2} + 2a_{2,3} \right) \sin(\theta)^2 - 2 \cos(\theta)^4 a_{1,1} \\
& + (a_{6,6} + 4a_{1,2}) \cos(\theta)^2 - 2a_{2,2}) \sin(\varphi)^2 + 2 \sin(\psi) \sin(\theta) \left((2a_{5,5} + 4a_{1,3} \right. \\
& \left. - 4a_{3,3}) \sin(\theta)^2 + (-2a_{5,5} + 4a_{1,1} - 4a_{1,3}) \cos(\theta)^2 + a_{4,4} - a_{6,6} - 2a_{1,2} \right. \\
& \left. + 2a_{2,3} \right) \cos(\psi) \cos(\theta) \sin(\varphi) + (a_{5,5} \cos(\theta)^4 - 2 \sin(\theta)^2 (a_{5,5} - 2a_{1,1} + 4a_{1,3} \\
& - 2a_{3,3}) \cos(\theta)^2 + a_{5,5} \sin(\theta)^4) \cos(\psi)^2 \cos(\varphi)^2 + \sin(\varphi)^2 \left(\sin(\psi)^2 (a_{4,4} \sin(\theta)^2 \right. \\
& \left. + a_{6,6} \cos(\theta)^2) \sin(\varphi)^2 - 2 \cos(\psi) \sin(\psi) \cos(\theta) \sin(\theta) (a_{4,4} - a_{6,6}) \sin(\varphi) \right. \\
& \left. + \cos(\psi)^2 (a_{4,4} \cos(\theta)^2 + a_{6,6} \sin(\theta)^2) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
ai_{6,6} := & \cos(\psi)^2 \left(a_{4,4} \sin(\theta)^2 + a_{6,6} \cos(\theta)^2 \right) \cos(\varphi)^4 + \left(-2 \cos(\psi)^2 \left(-2 a_{3,3} \sin(\theta)^4 \right. \right. \\
& + \left. \left. \left(-2 a_{5,5} - 4 a_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 + a_{4,4} + 2 a_{1,2} + 2 a_{2,3} \right) \sin(\theta)^2 - 2 \cos(\theta)^4 a_{1,1} \right. \\
& + \left. \left(a_{6,6} + 4 a_{1,2} \right) \cos(\theta)^2 - 2 a_{2,2} \right) \sin(\varphi)^2 - 2 \sin(\psi) \sin(\theta) \left(\left(2 a_{5,5} + 4 a_{1,3} \right. \right. \\
& - \left. \left. 4 a_{3,3} \right) \sin(\theta)^2 + \left(-2 a_{5,5} + 4 a_{1,1} - 4 a_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 + a_{4,4} - a_{6,6} - 2 a_{1,2} \right. \\
& + \left. 2 a_{2,3} \right) \cos(\psi) \cos(\theta) \sin(\varphi) + \sin(\psi)^2 \left(a_{5,5} \cos(\theta)^4 - 2 \sin(\theta)^2 \left(a_{5,5} - 2 a_{1,1} \right. \right. \\
& + \left. \left. 4 a_{1,3} - 2 a_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 + a_{5,5} \sin(\theta)^4 \right) \cos(\varphi)^2 + \left(\cos(\psi)^2 \left(a_{4,4} \sin(\theta)^2 \right. \right. \\
& + \left. \left. a_{6,6} \cos(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 + 2 \cos(\psi) \sin(\psi) \cos(\theta) \sin(\theta) \left(a_{4,4} - a_{6,6} \right) \sin(\varphi) \right. \\
& + \left. \sin(\psi)^2 \left(a_{4,4} \cos(\theta)^2 + a_{6,6} \sin(\theta)^2 \right) \right) \sin(\varphi)^2
\end{aligned}$$

Коэффициенты матрицы упругости:

$$\begin{aligned}
Ai_{1,1} := & \left(\sin(\theta)^4 A_{3,3} + 4 \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^4 A_{1,1} \right) \cos(\varphi)^4 \\
& + 4 \sin(\varphi)^2 \left(\left(\frac{1}{4} A_{1,2} + \frac{1}{4} A_{2,3} + A_{4,4} \right) \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^2 \left(A_{6,6} \right. \right. \\
& + \left. \left. \frac{1}{2} A_{1,2} \right) \right) \cos(\varphi)^2 + A_{2,2} \sin(\varphi)^4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ai_{1,2} := & \cos(\psi)^2 A_{1,2} \left(\cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2 \right) \cos(\varphi)^4 + \left(-4 \left(-\frac{1}{4} \cos(\theta)^4 A_{1,1} + \left(\left(-A_{5,5} \right. \right. \right. \right. \\
& - \left. \left. \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \sin(\theta)^2 + A_{6,6} \right) \cos(\theta)^2 - \frac{1}{4} \sin(\theta)^4 A_{3,3} + A_{4,4} \sin(\theta)^2 - \frac{1}{4} A_{2,2} \right) \\
& \cos(\psi)^2 \sin(\varphi)^2 - 4 \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\psi) \left(\left(-A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,1} - \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \right. \\
& + \left. \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \sin(\theta)^2 + A_{4,4} - A_{6,6} \right) \sin(\psi) \sin(\varphi) - 4 \left(\right. \\
& - \frac{1}{4} A_{1,3} \cos(\theta)^4 + \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{1}{4} A_{1,1} - \frac{1}{4} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 - \frac{1}{4} \sin(\theta)^4 A_{1,3} \left. \right) \\
& \sin(\psi)^2 \cos(\varphi)^2 + \sin(\varphi)^2 \left(\cos(\psi)^2 \left(\cos(\theta)^2 A_{1,2} + \sin(\theta)^2 A_{2,3} \right) \sin(\varphi)^2 \right. \\
& - 2 \cos(\psi) \sin(\psi) \cos(\theta) \sin(\theta) \left(A_{1,2} - A_{2,3} \right) \sin(\varphi) + \sin(\psi)^2 \left(\cos(\theta)^2 A_{2,3} \right. \\
& + \left. \left. \sin(\theta)^2 A_{1,2} \right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ai_{1,3} := & \sin(\psi)^2 A_{1,2} (\cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2) \cos(\varphi)^4 + \left(-4 \left(-\frac{1}{4} \cos(\theta)^4 A_{1,1} + \left(\left(-A_{5,5} \right. \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. - \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \sin(\theta)^2 + A_{6,6} \right) \cos(\theta)^2 - \frac{1}{4} \sin(\theta)^4 A_{3,3} + A_{4,4} \sin(\theta)^2 - \frac{1}{4} A_{2,2} \right) \\
& \sin(\psi)^2 \sin(\varphi)^2 + 4 \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\psi) \left(\left(-A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,1} - \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \right. \\
& \left. + \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \sin(\theta)^2 + A_{4,4} - A_{6,6} \right) \sin(\psi) \sin(\varphi) - 4 \cos(\psi)^2 \left(\right. \\
& \left. - \frac{1}{4} A_{1,3} \cos(\theta)^4 + \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{1}{4} A_{1,1} - \frac{1}{4} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 - \frac{1}{4} \sin(\theta)^4 A_{1,3} \right) \\
& \cos(\varphi)^2 + \left(\sin(\psi)^2 (\cos(\theta)^2 A_{1,2} + \sin(\theta)^2 A_{2,3}) \sin(\varphi)^2 \right. \\
& \left. + 2 \cos(\psi) \sin(\psi) \cos(\theta) \sin(\theta) (A_{1,2} - A_{2,3}) \sin(\varphi) + \cos(\psi)^2 (\cos(\theta)^2 A_{2,3} \right. \\
& \left. + \sin(\theta)^2 A_{1,2}) \right) \sin(\varphi)^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ai_{2,2} := & \left(\left(\sin(\theta)^4 A_{3,3} + 4 \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^4 A_{1,1} \right) \sin(\varphi)^4 \right. \\
& \left. + 4 \sin(\varphi)^2 \left(\left(\frac{1}{4} A_{1,2} + \frac{1}{4} A_{2,3} + A_{4,4} \right) \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^2 \left(A_{6,6} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. + \frac{1}{2} A_{1,2} \right) \right) \cos(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^4 A_{2,2} \right) \cos(\psi)^4 + 8 \sin(\theta) \cos(\theta) \sin(\varphi) \left(\left(\left(A_{5,5} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. - \frac{1}{2} A_{1,1} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 - \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \sin(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 \right. \\
& \left. + \cos(\varphi)^2 \left(A_{4,4} - A_{6,6} - \frac{1}{4} A_{1,2} + \frac{1}{4} A_{2,3} \right) \right) \sin(\psi) \cos(\psi)^3 + 4 \left(\left(\left(A_{5,5} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^4 - 4 \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{3}{8} A_{1,1} + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{3}{8} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 \right. \right. \\
& \left. \left. + \sin(\theta)^4 \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \right) \sin(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^2 \left(\left(\frac{1}{4} A_{1,2} + \frac{1}{4} A_{2,3} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. + A_{4,4} \right) \cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2 \left(A_{6,6} + \frac{1}{2} A_{1,2} \right) \right) \right) \sin(\psi)^2 \cos(\psi)^2 \\
& - 8 \sin(\theta) \cos(\theta) \left(\left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 - \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \right) \sin(\varphi) \sin(\psi)^3 \cos(\psi) + 4 \left(\frac{1}{4} \cos(\theta)^4 A_{3,3} + \left(A_{5,5} \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \sin(\theta)^2 + \frac{1}{4} \sin(\theta)^4 A_{1,1} \right) \sin(\psi)^4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ai_{2,3} := & \left(\left(\sin(\theta)^4 A_{1,3} - 4 \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{1}{4} A_{1,1} - \frac{1}{4} A_{3,3} \right) \cos(\theta) \right)^2 \right. \\
& + A_{1,3} \cos(\theta)^4 \left. \right) \sin(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^2 \left(\cos(\theta)^2 A_{2,3} + \sin(\theta)^2 A_{1,2} \right) \cos(\psi)^4 \\
& - 4 \sin(\theta) \cos(\theta) \left(\left(\left(-A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,3} + \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \sin(\theta)^2 + \left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} \right. \right. \right. \\
& + \left. \left. \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 + \left(-A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,1} - \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \sin(\theta)^2 + \left(A_{5,5} \right. \\
& + \left. \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 + \cos(\varphi)^2 \left(A_{4,4} - A_{6,6} - \frac{1}{2} A_{1,2} + \frac{1}{2} A_{2,3} \right) \\
& \sin(\varphi) \sin(\psi) \cos(\psi)^3 - 4 \left(\left(-\frac{1}{4} \sin(\theta)^4 A_{3,3} - \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \sin(\theta)^2 \right. \right. \\
& - \left. \left. \frac{1}{4} \cos(\theta)^4 A_{1,1} \right) \sin(\varphi)^4 + \left(A_{5,5} \sin(\theta)^4 + \left(-2 A_{5,5} + A_{1,1} - 2 A_{1,3} \right. \right. \right. \\
& + \left. \left. A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 - \cos(\varphi)^2 \left(\frac{1}{4} A_{1,2} + \frac{1}{4} A_{2,3} + A_{4,4} \right) \right) \sin(\theta)^2 \\
& + \cos(\theta)^2 \left(A_{5,5} \cos(\theta)^2 - \left(A_{6,6} + \frac{1}{2} A_{1,2} \right) \cos(\varphi)^2 \right) \sin(\varphi)^2 - \frac{1}{4} \sin(\theta)^4 A_{1,1} \\
& + \left(\cos(\theta)^2 \left(-A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,3} \right) + A_{6,6} \cos(\varphi)^2 \right) \sin(\theta)^2 + A_{4,4} \cos(\theta)^2 \cos(\varphi)^2 \\
& - \frac{1}{4} \cos(\theta)^4 A_{3,3} - \frac{1}{4} \cos(\varphi)^4 A_{2,2} \left. \right) \sin(\psi)^2 \cos(\psi)^2 + 4 \left(\left(\left(-A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,3} \right. \right. \right. \\
& + \left. \left. \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \sin(\theta)^2 + \left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 + \left(-A_{5,5} \right. \\
& + \left. \frac{1}{2} A_{1,1} - \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \sin(\theta)^2 + \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 + \cos(\varphi)^2 \left(A_{4,4} \right. \\
& - \left. A_{6,6} \right) \left. \right) \sin(\theta) \cos(\theta) \sin(\varphi) \sin(\psi)^3 \cos(\psi) - 4 \left(\left(-\frac{1}{4} A_{1,3} \cos(\theta)^4 \right. \right. \\
& + \left. \left. \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{1}{4} A_{1,1} - \frac{1}{4} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 - \frac{1}{4} \sin(\theta)^4 A_{1,3} \right) \sin(\varphi)^2 \right. \\
& \left. - \frac{1}{4} \cos(\varphi)^2 A_{1,2} \left(\cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2 \right) \right) \sin(\psi)^4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ai_{3,3} := & \left(\left(\sin(\theta)^4 A_{3,3} + 4 \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^4 A_{1,1} \right) \sin(\varphi)^4 \right. \\
& + 4 \sin(\varphi)^2 \left(\left(\frac{1}{4} A_{1,2} + \frac{1}{4} A_{2,3} + A_{4,4} \right) \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^2 \left(A_{6,6} \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{2} A_{1,2} \right) \right) \cos(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^4 A_{2,2} \left. \right) \sin(\psi)^4 \\
& - 8 \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\psi) \sin(\varphi) \left(\left(\left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 - \left(A_{5,5} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \sin(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^2 \left(A_{4,4} - A_{6,6} - \frac{1}{4} A_{1,2} \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{4} A_{2,3} \right) \right) \sin(\psi)^3 + 4 \left(\left(\left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^4 - 4 \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{3}{8} A_{1,1} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{3}{8} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^4 \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \right) \sin(\varphi)^2 \\
& + \cos(\varphi)^2 \left(\left(\frac{1}{4} A_{1,2} + \frac{1}{4} A_{2,3} + A_{4,4} \right) \cos(\theta)^2 + \sin(\theta)^2 \left(A_{6,6} + \frac{1}{2} A_{1,2} \right) \right) \left. \right) \\
& \sin(\psi)^2 \cos(\psi)^2 + 8 \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\psi)^3 \left(\left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 \right. \\
& \left. - \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \right) \sin(\varphi) \sin(\psi) + 4 \cos(\psi)^4 \left(\frac{1}{4} \cos(\theta)^4 A_{3,3} \right. \\
& \left. + \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \sin(\theta)^2 + \frac{1}{4} \sin(\theta)^4 A_{1,1} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ai_{4,4} := & \left(\left(A_{5,5} \cos(\theta)^4 - 2 \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} + A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 \right. \right. \\
& \left. \left. + A_{5,5} \sin(\theta)^4 \right) \sin(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^2 \left(A_{4,4} \cos(\theta)^2 + A_{6,6} \sin(\theta)^2 \right) \right) \cos(\psi)^4 \\
& - 4 \sin(\theta) \cos(\theta) \left(\left(\left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 - \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \sin(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 + \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 + \left(-A_{5,5} \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} A_{1,1} - \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \sin(\theta)^2 + \cos(\varphi)^2 \left(A_{4,4} - A_{6,6} - \frac{1}{4} A_{1,2} + \frac{1}{4} A_{2,3} \right) \\
& \sin(\varphi) \sin(\psi) \cos(\psi)^3 - 2 \sin(\psi)^2 \left(\left(-\frac{1}{2} \cos(\theta)^4 A_{1,1} - 2 \left(A_{5,5} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 \sin(\theta)^2 - \frac{1}{2} \sin(\theta)^4 A_{3,3} \right) \sin(\varphi)^4 + \left((A_{1,3} + A_{5,5}) \cos(\theta)^4 \right. \\
& \left. + \left((-6A_{5,5} + 2A_{1,1} - 2A_{1,3} + 2A_{3,3}) \sin(\theta)^2 - 2 \left(A_{6,6} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{2} A_{1,2} \right) \cos(\varphi)^2 \right) \cos(\theta)^2 - 2 \sin(\theta)^2 \left(\left(-\frac{1}{2} A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \sin(\theta)^2 \right. \\
& \left. + \cos(\varphi)^2 \left(\frac{1}{4} A_{1,2} + \frac{1}{4} A_{2,3} + A_{4,4} \right) \right) \sin(\varphi)^2 - \frac{1}{2} \cos(\theta)^4 A_{3,3} + \left((-2A_{5,5} \right. \\
& \left. - A_{1,3}) \sin(\theta)^2 + \cos(\varphi)^2 \left(\frac{1}{2} A_{2,3} + A_{4,4} + \frac{1}{2} A_{1,2} \right) \right) \cos(\theta)^2 - \frac{1}{2} \sin(\theta)^4 A_{1,1} \\
& + \cos(\varphi)^2 \left(A_{6,6} + A_{1,2} \right) \sin(\theta)^2 - \frac{1}{2} \cos(\varphi)^4 A_{2,2} \Big) \cos(\psi)^2 \\
& + 4 \sin(\theta) \cos(\theta) \left(\left(\left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 - \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \sin(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 + \left(A_{5,5} + \frac{1}{2} A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 + \left(-A_{5,5} \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} A_{1,1} - \frac{1}{2} A_{1,3} \right) \sin(\theta)^2 + \cos(\varphi)^2 \left(A_{4,4} - A_{6,6} - \frac{1}{4} A_{1,2} + \frac{1}{4} A_{2,3} \right) \\
& \sin(\varphi) \sin(\psi)^3 \cos(\psi) + \sin(\psi)^4 \left(\left(A_{5,5} \cos(\theta)^4 - 2 \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} + A_{1,3} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{1}{2} A_{3,3} \right) \cos(\theta)^2 + A_{5,5} \sin(\theta)^4 \right) \sin(\varphi)^2 + \cos(\varphi)^2 \left(A_{4,4} \cos(\theta)^2 \right. \\
& \left. \left. + A_{6,6} \sin(\theta)^2 \right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ai_{5,5} := & \sin(\psi)^2 \left(A_{4,4} \sin(\theta)^2 + A_{6,6} \cos(\theta)^2 \right) \cos(\varphi)^4 + \left(-2 \left(-\frac{1}{2} \sin(\theta)^4 A_{3,3} + \left(\right. \right. \right. \\
& -2A_{5,5} - A_{1,3} \left. \right) \cos(\theta)^2 + \frac{1}{2} A_{2,3} + A_{4,4} + \frac{1}{2} A_{1,2} \left. \right) \sin(\theta)^2 - \frac{1}{2} \cos(\theta)^4 A_{1,1} \\
& + \left(A_{6,6} + A_{1,2} \right) \cos(\theta)^2 - \frac{1}{2} A_{2,2} \left. \right) \sin(\psi)^2 \sin(\varphi)^2 + 2 \left(\sin(\theta)^2 \left(2A_{5,5} + A_{1,3} \right. \right. \\
& - A_{3,3} \left. \right) + \left(-2A_{5,5} + A_{1,1} - A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 + A_{4,4} - A_{6,6} - \frac{1}{2} A_{1,2} + \frac{1}{2} A_{2,3} \left. \right) \\
& \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\psi) \sin(\psi) \sin(\varphi) + \left(A_{5,5} \cos(\theta)^4 - 2 \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} \right. \right. \\
& + A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \left. \right) \cos(\theta)^2 + A_{5,5} \sin(\theta)^4 \left. \right) \cos(\psi)^2 \left. \right) \cos(\varphi)^2 \\
& + \left(\sin(\psi)^2 \left(A_{4,4} \sin(\theta)^2 + A_{6,6} \cos(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 \right. \\
& - 2 \cos(\psi) \sin(\psi) \cos(\theta) \sin(\theta) \left(A_{4,4} - A_{6,6} \right) \sin(\varphi) + \cos(\psi)^2 \left(A_{4,4} \cos(\theta)^2 \right. \\
& \left. \left. + A_{6,6} \sin(\theta)^2 \right) \right) \sin(\varphi)^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ai_{6,6} := & \cos(\psi)^2 \left(A_{4,4} \sin(\theta)^2 + A_{6,6} \cos(\theta)^2 \right) \cos(\varphi)^4 + \left(-2 \left(-\frac{1}{2} \sin(\theta)^4 A_{3,3} + \left(\right. \right. \right. \\
& -2A_{5,5} - A_{1,3} \left. \right) \cos(\theta)^2 + \frac{1}{2} A_{2,3} + A_{4,4} + \frac{1}{2} A_{1,2} \left. \right) \sin(\theta)^2 - \frac{1}{2} \cos(\theta)^4 A_{1,1} \\
& + \left(A_{6,6} + A_{1,2} \right) \cos(\theta)^2 - \frac{1}{2} A_{2,2} \left. \right) \cos(\psi)^2 \sin(\varphi)^2 - 2 \left(\sin(\theta)^2 \left(2A_{5,5} + A_{1,3} \right. \right. \\
& - A_{3,3} \left. \right) + \left(-2A_{5,5} + A_{1,1} - A_{1,3} \right) \cos(\theta)^2 + A_{4,4} - A_{6,6} - \frac{1}{2} A_{1,2} + \frac{1}{2} A_{2,3} \left. \right) \\
& \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\psi) \sin(\psi) \sin(\varphi) + \left(A_{5,5} \cos(\theta)^4 - 2 \sin(\theta)^2 \left(A_{5,5} - \frac{1}{2} A_{1,1} \right. \right. \\
& + A_{1,3} - \frac{1}{2} A_{3,3} \left. \right) \cos(\theta)^2 + A_{5,5} \sin(\theta)^4 \left. \right) \sin(\psi)^2 \left. \right) \cos(\varphi)^2 \\
& + \sin(\varphi)^2 \left(\cos(\psi)^2 \left(A_{4,4} \sin(\theta)^2 + A_{6,6} \cos(\theta)^2 \right) \sin(\varphi)^2 \right. \\
& + 2 \cos(\psi) \sin(\psi) \cos(\theta) \sin(\theta) \left(A_{4,4} - A_{6,6} \right) \sin(\varphi) + \sin(\psi)^2 \left(A_{4,4} \cos(\theta)^2 \right. \\
& \left. \left. + A_{6,6} \sin(\theta)^2 \right) \right)
\end{aligned}$$

Приложение II. Результаты экспериментальных исследований плотности брикетов

<i>P</i> , МПа	<i>ω</i> , %	<i>f</i> , мм	<i>W</i> , %	<i>ρ</i> , кг/м ³				
				1	2	3	4	5
100	70	4,5	7,5	1060	1120	1050	1060	1050
100	37,5	4,5	14	1010	990	900	1010	970
70	25	3	5	720	690	670	700	700
130	50	3	5	1110	1120	1120	1170	1060
100	5	4,5	7,5	800	770	790	820	780
130	50	3	10	1300	1090	1230	1290	1250
70	25	6	5	600	630	650	640	610
130	25	3	10	1130	1080	1070	1100	1060
100	37,5	4,5	7,5	920	880	880	900	880
70	50	3	5	760	830	770	760	750
130	50	6	5	1080	1060	1110	1070	1110
100	37,5	1,5	7,5	990	980	1040	1040	1010
130	25	6	10	910	990	950	940	920
175	37,5	4,5	7,5	1310	1330	1290	1270	1240
70	25	3	10	800	730	760	820	730
70	50	6	10	740	670	740	720	760
130	25	3	5	980	1010	980	980	990
130	25	6	5	910	870	880	920	910
70	50	3	10	900	860	870	860	890

P , МПа	ω , %	f , мм	W , %	ρ , кг/м ³				
				1	2	3	4	5
100	37,5	7,5	7,5	760	780	800	730	770
100	37,5	4,5	1	780	810	840	800	790
70	50	6	5	650	680	670	660	710
130	50	6	10	1150	1100	1040	1110	1100
25	37,5	4,5	7,5	480	440	460	480	500
70	25	6	10	630	670	640	670	660

**Приложение III. Результаты экспериментальных исследований
прочности брикетов**

<i>P</i> , МПа	ω , %	<i>f</i> , мм	<i>W</i> , %	<i>DU</i> , %				
				1	2	3	4	5
100	70	4,5	7,5	53,90	56,38	54,33	53,92	54,79
100	37,5	4,5	14	47,24	46,32	48,75	45,50	45,95
70	25	3	5	13,35	13,94	13,68	13,33	13,76
130	50	3	5	66,33	69,76	67,84	69,04	67,00
100	5	4,5	7,5	27,60	27,63	28,10	26,45	28,59
130	50	3	10	86,74	94,91	92,35	92,03	98,29
70	25	6	5	6,44	6,72	6,67	6,56	6,38
130	25	3	10	80,50	77,22	75,25	78,34	73,36
100	37,5	4,5	7,5	35,11	34,16	32,80	34,76	34,85
70	50	3	5	16,71	17,35	18,08	16,06	17,58
130	50	6	5	54,46	53,89	53,93	56,31	57,42
100	37,5	1,5	7,5	52,27	47,88	49,71	51,19	51,38
130	25	6	10	49,54	47,79	46,93	47,24	46,83
175	37,5	4,5	7,5	100,32	100,66	105,37	97,85	101,21
70	25	3	10	25,48	25,15	23,93	24,24	24,66
70	50	6	10	14,33	14,04	13,89	14,92	14,26
130	25	3	5	54,71	55,92	52,91	52,16	52,13
130	25	6	5	40,68	41,20	37,86	38,76	38,49
70	50	3	10	28,97	30,52	29,88	28,71	31,07

P , МПа	ω , %	f , мм	W , %	DU , %				
				1	2	3	4	5
100	37,5	7,5	7,5	20,00	20,52	20,43	20,44	20,44
100	37,5	4,5	1	18,60	18,59	18,64	19,22	19,30
70	50	6	5	10,02	10,64	10,50	10,46	11,22
130	50	6	10	62,29	62,20	63,86	66,44	64,74
25	37,5	4,5	7,5	0,62	0,63	0,64	0,60	0,59
70	25	6	10	10,70	10,37	10,45	10,22	10,51