



ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛТЕТ „ГОРСКА ПРОМИШЛЕННОСТ“
Катедра „Механична технология на дървесината“



ИНЖ. ХРИСТИЯН НАЙДЕНОВ ПАНЧЕВ

**ВЛИЯНИЕ НА НЯКОИ ТЕХНОЛОГИЧНИ ФАКТОРИ ВЪРХУ
ЕКСПЛОАТАЦИОННИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА ПЛОЧИ, ПОЛУЧЕНИ
С УЧАСТИЕ НА РЕЦИКЛИРАНИ ДЪРВЕСНИ ВЛАКНА**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на образователна
и научна степен „доктор“

Област на висшето образование: 5. „Технически науки“

Професионално направление: 5.13. Общо инженерство

Научна специалност: „Дървесиноведие и дървесни материали“

Научен ръководител: проф. д-р инж. Виктор Петров Савов

Рецензенти: проф. д-р инж. Иво Владимиров Вълчев

проф. д-р инж. Веселин Стаменов Брезин

София, 2024

Дисертационният труд е с общ обем от 157 страници. В текста са използвани 57 формули, 28 таблици и 37 фигури. Използваната литература включва 124 източници, от които 4 на кирилица, 109 на латиница, 10 стандартта (на кирилица и латиница) и 1 интернет източника.

Номерацията на главите, таблиците и фигурите в автореферата съответства на тези от дисертацията.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 30.09.2024 г. от 13:00 часа в зала „Акад. Мако Даков“ на Лесотехническия университет, гр. София, бул. „Св. Климент Охридски“ № 10 на открито заседание на Научно жури, утвърдено със заповед № ЗПС-286/23.05.2024 г. в състав:

- Председател:** проф. д-р инж. Димитър Христов Ангелскив – вътрешен
- Членове:** проф. д-р инж. Васил Живков Живков – вътрешен
проф. д-р инж. Сачи Константинова Ненкова – външен, ХТМУ
проф. д-р инж. Веселин Стаменов Брезин – пенсионер
проф. д-р инж. Иво Владимир Вълчев – външен, ХТМУ
- Резервни членове:** проф. д-р инж. Петър Йорданов Антов – вътрешен
проф. д-р инж. Панайот Ангелов Панайотов – пенсионер

Настоящата дисертационна работа е разработена по време на редовно обучение за придобиване на образователна и научна степен „доктор“ към катедра „Механична технология на дървесината“, факултет „Горска промишленост“ при Лесотехническия университет, София. Изследванията по дисертационния труд са проведени в лабораториите на Лесотехническия университет, София, Химикотехнологичен и металургичен университет – София, „Велде-България“ АД, Троян, „Кастамону-България“ АД, с. Горно Сахране и „Кроношпан-България“ ЕООД, Велико Търново.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се на сайта на Лесотехническия университет (<http://www.ltu.bg/>) и в деканата на ФГП, стая № 221, Лесотехнически университет, гр. София, бул. „Св. Климент Охридски“ № 10.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Производството на плочи от дървесни влакна (ПДВ) със средна плътност е едно от развиващите се дървопреработвателни промишлености с устойчиви темпове на нарастване на количествата произвеждана продукция. Двадесет и пет процента от ПДВ със средна плътност приключват жизнения си цикъл до 1 година, до 5 години делът се увеличава до 50%, до 10 години жизненият си цикъл приключват 80% от плочите от този вид производство. За разлика от плочите от дървесни частици (ПДЧ), то ПДВ със средна плътност не могат да се рециклират без деструкция на свързващите вещества, което се осъществява чрез хидролиза. При хидротермичната хидролиза остават нерешени съществени проблеми, като оптимален нискотемпературен режим на хидролиза, оптимално количество рециклирани влакна в състава на ПДВ, подходящ вид съоръжение за развълкнаване на рециклируемите плочи, оптимален състав на ПДВ с участие на рециклирани влакна, което обуславя и актуалността на работата.

Цел и задачи на дисертационния труд

Въз основа на изведените изводи относно изследваните, решените и нерешените въпроси в областта на изследвания проблем, се определя следната цел на дисертационната работа:

Изследване и установяване на влиянието на някои технологични фактори върху експлоатационните показатели на плочи от дървесни влакна със средна плътност с участие на рециклирани дървесни влакна.

За постигане на така определената цел, е необходимо да бъдат решени следните експериментални задачи чрез избрана и описана методика:

1. определяне на подходящи гранични стойности на режимните фактори при рециклиране на плочи от дървесни влакна с прилагане на хидротермична хидролиза;
2. установяване на влиянието на режима на хидротермична хидролиза върху показателите на рециклираните дървесни влакна;
3. избор на оптимален режим на хидротермична хидролиза, по отношение на показателите на влакната;
4. установяване на влиянието на участието на рециклирани

влакна върху показателите на плочи от дървесни влакна със средна плътност;

5. оптимизиране на състава и лепилната композиция по отношение на показателите на плочи с участие на рециклирани влакна.

Обект, предмет и методи на изследване

Предмет на изследването е установяване на възможността за получаване на ПДВ със средна плътност с участие на рециклирани влакна.

В резултат на извършения литературен обзор и направените изводи се прие рециклирането на ПДВ със средна плътност да се осъществи посредством предварително обработване чрез хидротермична хидролиза (пропарване) за разрушаване на свързващите вещества (карбамидформалдехидна смола) в плочите.

В съответствие с поставените цели и планираните изследвания, обектите на изследване в дисертационния труд са режимните фактори при хидротермична хидролиза и влиянието на състава на ПДВ със средна плътност върху техните експлоатационни показатели.

Апробация на работата

Резултатите от дисертационния труд са докладвани и обсъждани в катедра „Механична технология на дървесината“ на Лесотехническият университет – София, а също така и са публикувани в специализирани списания с импакт фактор и кватил Q1.

Обем и структура на дисертационния труд

Дисертационният труд е разработен в обем от 157 страници, в това число 37 фигури и 33 таблици. Списъкът на използваната литература включва 124 заглавия, от които 13 на кирилица и 111 на латиница. Работата е структурирана в увод, 3 глави и заключение.

ГЛАВА ПЪРВА. СЪСТОЯНИЕ НА ВЪПРОСА

В резултат от проведеното литературно проучване и анализ относно методите за рециклиране на плочи от дървесни влакна, може да се направят следните основни изводи:

Изследвани и решени въпроси

1. Производството на плочи от дървесни влакна е една от промишленостите с устойчив темп на растеж на произвеждана-

та продукция, като основното количество плочи са тези произведени по сух метод. В много държави от ЕС се забранява депонирането на отпадъчните плочи в общите сметища, като се очаква това да стане единна европейска практика.

2. Жизненият цикъл на плочите от дървесни влакна е от 4 до 50 години, като 25% от плочите от дървесни влакна със средна плътност приключват жизнения си цикъл до 1 година, до 5 години делът се увеличава до 50%, до 10 години жизненият си цикъл приключват 80% от плочите, а до 45 години – 99%.
3. Основният вид свързващо вещество, използвано при производството на плочи от дървесни влакна по сух метод, е карбамидформалдехидна смола, като на практика този вид свързващо вещество няма устойчивост на хидролиза.
4. Към настоящия момент няма утвърдена промишлена практика за рециклиране на плочи от дървесни влакна със средна плътност.
5. Изследванията в областта на рециклирането на плочи от дървесни влакна могат да се разделят в две отделни направления – с и без прилагане на предварително обработване преди разvlakняване.
6. Когато не се прилага предварително обработване преди рециклирането, получените влакна са с по-ниска стройност, а плочите с участие на такива влакна са с повишени емисии на формалдехид.
7. Оптималното съдържание на рециклирани влакна от общата дървесновлакнеста маса, без деструкция на свързващите вещества, е 5%. За да се увеличени този процент е необходимо използване на добавки към лепилната композиция, което ще увеличи стойността на продукцията.
8. Предварителното обработване на плочите при рециклиране се осъществява основно посредством хидролиза и в много по-малка степен чрез електролиза за извличане на свързващите вещества.
9. Химичната (киселинна) хидролиза при рециклиране е значително по-бърза спрямо хидротермичната, но изисква увеличени разходи за използване на химични реагенти и води до увеличена замърсеност на отпадните води.

10. Най-перспективен и възможен за приложение метод за предварително третиране при рециклиране на плочи от дървесни влакна се очертава използването на хидротермична хидролиза на свързващите вещества.
11. При използването на рециклирани чрез хидролиза влакна се намаляват емисиите на формалдехид от плочите произведени с тях, но се налага увеличаване на времето за горещо пресуване.
12. Повишаването на температурата на хидротермично обработване от 125 на 150°C води до влошаването на показателите на рециклираните влакна и на получените от тях плочи;
13. При температура на обработване под 121°C не се наблюдава пълна хидролиза на карбамидформалдехидната смола и получените при такива условия плочи с рециклирани влакна имат влошени физикомеханични показатели, както и увеличено съдържание на свободен формалдехид.

Нерешени въпроси

1. Не е изведен оптимален режим на хидротермична хидролиза, с оглед показателите на рециклираните влакна, при размери на рециклируемия материал сходни с тези на технологичните трески, използвани за производство на дървесновлакнестата маса.
2. Не е изяснено влиянието на режима на хидролиза върху показателите на рециклираните влакна и получените от тях плочи при прилагане на температури на процеса в диапазона от 121°C (налягане на парата 0,2 MPa) до 134°C (налягане на парата 0,3 MPa).
3. Не е напълно изяснено влиянието на различните съоръжения за разvlakняване върху показателите на рециклираните влакна.
4. Не е установено оптимално отношение между съдържанието на рециклирани и натурални влакна в производството на ПДВ при използване на понижени температури на хидролиза.
5. Не е установено влиянието на лепилната композиция върху показателите на плочите с участие на рециклирани влакна и възможността за повишаване на съдържанието на рециклиран материал в състава на плочите с модифициране на лепилната композиция.

ГЛАВА ВТОРА. МЕТОДИКА НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

2.1. ПЛАН НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

В резултат от анализа на нерешените въпроси в изследваната област се установи, че не е изяснено влиянието на режима на хидролиза върху показателите на рециклираните влакна и получените от тях плочи при прилагане на температури на процеса в диапазона от 121°C (налягане на парата 0,2 МПа) до 134°C (налягане на парата 0,3 МПа). Също така не е напълно изяснено влиянието върху показателите на рециклираните влакна на различни съоръжения за разvlakняване при рециклиране. Поради това се състави план на изследванията с три продължителности на хидротермична хидролиза (30 min, 45 min и 60 min) и две температури – 121 и 134° (Табл. 1).

За да се установи влиянието на режима на хидротермична хидролиза върху показателите на плочи от рециклирани влакна се използва планът на изследвания, представен в Табл. 2.

Таблица 1. План на изследванията за установяване на влиянието на режима на хидротермична хидролиза върху показателите на рециклираните влакна

Опитна серия №	Температура на хидротермичната хидролиза T , °C	Продължителност на хидротермичната хидролиза τ , min
1	121	30
2	121	45
3	121	60
4	134	30
5	134	45
6	134	60

Таблица 2. План на изследванията за установяване на влиянието на режима на хидротермична хидролиза върху показателите на плочи от рециклирани влакна

Тип на плочата	Зададена плътност	Температура на хидротермичната хидролиза T , °C	Продължителност на хидротермичната хидролиза τ , min
A	780	121	30
B	780	121	45
C	780	121	60
D	780	134	30
E	780	134	45
F	780	134	60
REF (Контролна)	780	0	0

За целите на изследването беше определено първоначалните изследвания да се осъществят със стъпка на изменение на съдържанието на рециклирани влакна от 20% (Табл. 3).

Таблица 3. План на изследванията за установяване на влиянието съдържанието на рециклирани влакна върху показателите на ПДВ със средна плътност

Опитна серия №	Съдържание на рециклирани влакна P , %
1	0
2	20
3	40
4	60
5	80
6	100

За да се изследва възможността за увеличаване на общото съдържание на рециклирани влакна в състава на ПДВ със средна плътност посредством увеличаване на съдържанието на свързващо вещество е проведен планиран експеримент при използване на D -оптимални композиционни планове (Табл. 4).

Таблица 4. План на изследванията за установяване на влиянието на съдържанието на рециклирани влакна и свързващо вещество

Опитна серия №	Съдържание на рециклирани влакна X_1	Съдържание на КФС X_2
1	-1	-1
2	-1	+1
3	+1	-1
4	+1	+1
5	-1	0
6	+1	0
7	0	-1
8	0	+1
9	0	0

2.2. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА РЕЦИКЛИРАНИТЕ ВЛАКНА

Фракционният състав на дървесните влакна е определен на проба от 20 g влакна, чрез механично сортиране, посредством лабораторен фракционен апарат.

Влакната се поставят на най-горното сито на фракционния апарат, след което последният се включва за 2 min. Определя се масата на влакната върху всяко сито. Относителният дял на отделните фракции се определя по формулата:

$$P_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \%, \quad (1)$$

където: P_i е делът на отделната фракция, %;

m_i – масата на влакната задържани върху даденото сито, g;

m – масата на цялата проба, g.

По този начин влакната ще се разделят в следните фракции: над 8,0 mm; 8,0 – 6,3 mm; 6,3 – 4,0 mm; 4,0 – 2,0 mm; 2,0 – 1,0 mm; 1,0 – 0,8 mm; 0,8 – 0,5 mm; 0,500 – 0,315 mm; 0,315 – 0,200 mm; 0,200 – 0,100 mm; под 0,100 mm.

За изследване на влиянието на режима по хидротермична хидролиза върху химичната структура на влакната е обърнато внимание на съдържанието на най-неустойчивите компоненти на дървесината – хемицелулозите (пентозаните).

Съдържанието на хемицелулози ще се определи по стандартизиран метод TAPPI T223 CM-01 *Пентозани в дървесина и лигноцелуозна маса*. Същността на метода се състои в превръщане на хемицелулозите във фурфурол посредством кипяща солна киселина. Фурфуролът се събира в дестилат и се определя колориметрично с реагент на орцинол-ферихлорид. Използваните химични реагенти са: NH_4SCl , $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_2$, FeCl_3 , NaCl , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Съдържанието на пентозани се определя по формулата:

$$P = \frac{A}{10 \cdot W} \cdot 100, \%, \quad (2)$$

където: P е съдържанието на пентозани, %;

A – ксиланът в опитния образец, mg;

W – масата на пробата в абсолютно сухо състояние, g.

Химическата потребност от кислород (ХПК) е количеството разтворен кислород, което трябва да присъства във водата, за да се окислят химически органични материали (HachLange). ХПК се използва за измерване на краткосрочното въздействие на отпадъчните води върху нивата на кислород в приемащите води.

ХПК се изчислява по формулата:

$$\text{ХПК} = \frac{(W_1 - W_2) \cdot N \cdot 8\,000}{V}, \text{ mg. l}^{-1}, \quad (3)$$

където: W_1 е количеството на солния разтвор на Мор, използван за титруване на анализираната проба, mg;

W_2 – количеството на солния разтвор на Мор, използван за контролно титруване, mg;

N – нормалността на солевия разтвор на Мор, определена чрез бихромат;

V – обемът на пробата, l.

За целта на настоящата работа инфрачервената спектроскопия ще се използва за анализ на функционалните групи в рециклираните и натуралните влакна. Целта на изследването е да се установи дали са протекли процеси по деструкция на КФС от рециклируемите плочи. Същността на метода е в различната абсорпция в инфрачервения спектър на отделните функционални групи в органичните и неорганичните съединения.

За целта на изследването е използвана централната научноизследователска лаборатория в ХТМУ, като анализът е осъществен на 1 g дървесни влакна, при използване на инфрачервен спектрофотометър Varian 600-IR (САЩ).

2.3. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЕКСПЛОАТАЦИОННИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА ПЛОЧИ ОТ ДЪРВЕСНИ ВЛАКНА

Определянето на плътността на плочите от дървесни влакна ще се извърши съгласно изискванията на БДС EN 323:2001 *Плочи дървесни. Определяне на плътността*.

Плътността на отделните пробни тела ще се изчисли по формулата:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \cdot b_2 \cdot t} \cdot 10^6, \text{ kg.m}^{-3}, \quad (4)$$

където: m е маса на пробното тяло, g;

b_1, b_2 – дължините на страните на пробното тяло, mm ($b_1 = b_2 = 50$ mm);

t – дебелината на пробното тяло, mm.

Определянето на съдържанието на вода на плочите от дървесни влакна ще се осъществи съгласно БДС EN 322:1998 *Плочи дървесни*.

Определяне съдържанието на вода.

Съдържанието на вода (H) за всяко пробно тяло се изчислява в проценти от масата му с точност 0,1% по формулата:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \cdot 100, \%, \quad (5)$$

където: m_H – началната маса на пробното тяло, g;

m_0 – масата на пробното тяло след изсушаване, g.

Водопоглъщането на дървесните плочи е свързано с поемането на вода от клетъчните стени на дървесните елементи и запълването на клетъчните празнини и поровото пространство. Този показател не е стандартизиран.

Определянето на набъбването по дебелина след потапяне във вода на плочи от дървесни влакна е извършено съгласно методиката, определена в БДС EN 317:1998 *Плочи от дървесни частици и от дървесни влакна. Определяне на набъбването по дебелина след потапяне във вода.*

Водопоглъщането се изчислява отделно за всяко пробно тяло по формулата:

$$A = \frac{m_A - m_H}{m_H} \cdot 100, \%, \quad (6)$$

където: m_H – масата на пробното тяло преди потапяне, g;

m_A – масата на пробното тяло след потапяване, g.

Приема се средноаритметична стойност от всички измервания с точност до 0,1%.

Набъбването по дебелина на пробно тяло G_t се изчислява в проценти от първоначалната му дебелина по формулата:

$$G_t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \cdot 100, \%, \quad (7)$$

където: t_1 – дебелината на пробното тяло преди потапянето, mm;

t_2 – дебелината на пробния тяло след потапянето, mm.

Набъбването по дебелина се изразява с точност до една десета.

Модулът на еластичност и якостта при огъване се определя съгласно методиката представена в БДС EN 310:1999 *Плочи дървесни. Определяне модула на еластичност при огъване и якостта при огъване.*

Якост при огъване (f_m) за всяко пробно тяло се изчислява по формулата:

$$f_m = \frac{3.F_{max}.l_1}{2.b.t^2}, \text{ N.mm}^{-2} \quad (8)$$

където: F_{max} е разрушаващото натоварване, N;

l_1 – разстоянието между центровете на опорите, mm;

b – ширината на пробните тела, mm;

t – дебелината на пробните тела, mm.

Якостта при огъване се изчислява с точност до 1 N.mm⁻².

Модулът на еластичност при огъване се определя по същата методика, като се изчислява по формулата:

$$E_m = \frac{l_1^3(F_2 - F_1)}{4.b.t^3(a_2 - a_1)}, \text{ N.mm}^{-2} \quad (9)$$

където: l_1 е разстоянието между центровете на опорите, mm;

b – широчината на пробното тяло, mm;

t – дебелината на пробното тяло, mm;

$F_2 - F_1$ – разликата между горната и долна граница на натоварване, N (съответно би следвало да бъдат 0,4 и 0,1 от F_{max});

$a_2 - a_1$ – разликата в стрелката на провисване при сили съответно F_2 и F_1 .

Якостта на напречен опън на плочите от дървесни влакна е определена съгласно изискванията на БДС EN 319:2005 *Плоча от дървесни частици и от дървесни влакна. Определяне на якостта на опън перпендикулярно на равнината на плочата*.

Якостта на напречен опън за всяко пробно тяло ($f_{\perp}$, N.mm⁻²), изразени в до два знака след десетичната запетая, се изчислява по формулата:

$$f_t = \frac{F_{max}}{a.b}, \text{ N.mm}^{-2}, \quad (2.24)$$

където: F_{max} е разрушаващото натоварване, N;

a, b – дължината и ширината на пробното тяло, mm.

2.5.6. Определяне на свободния формалдехид в плочите от дървесни влакна

Определянето на съдържанието на формалдехид (P_{HCHO}) се извършва по перфораторния метод, съгласно БДС EN 120: 2002. Изследват се пробни образци 25 mm x 25 mm x d mm, където d е дебелината на плочите.

Съдържанието на формалдехид в плочите се определя по формулата:

$$P_{HCHO} = \frac{C \cdot V_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot (100 + W)}{M}, \text{ mg/100g, (2.25)} \quad (2.25)$$

където: C е концентрацията на формалдехид, определена по градуирана крива, в mg/ml;

V_0 – обемът на разтвора получен при изпитване на пробите, ml;

K_1 – коефициентът, отчитащ разреждането на изследвания разтвор на формалдехид с вода;

K_2 – коефициентът, отчитащ разреждането на изследвания разтвор на формалдехид с ацетилацетон и амониев ацетат;

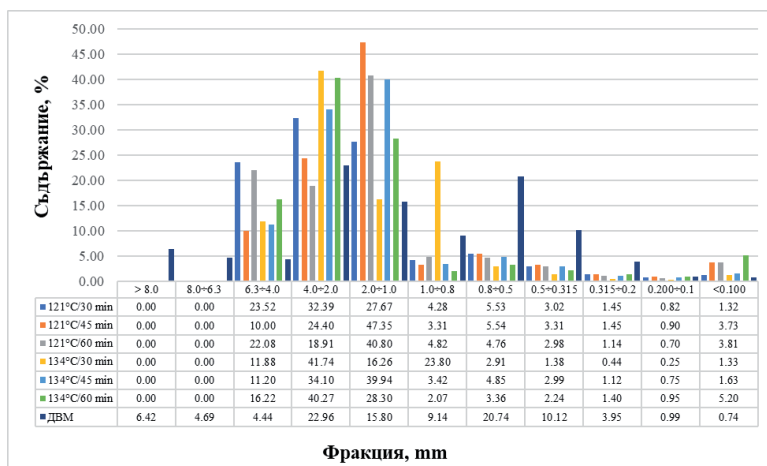
W – влажността на пробите, %;

M – масата на образеца преди изпитването за токсичност, g.

ГЛАВА ТРЕТА. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ

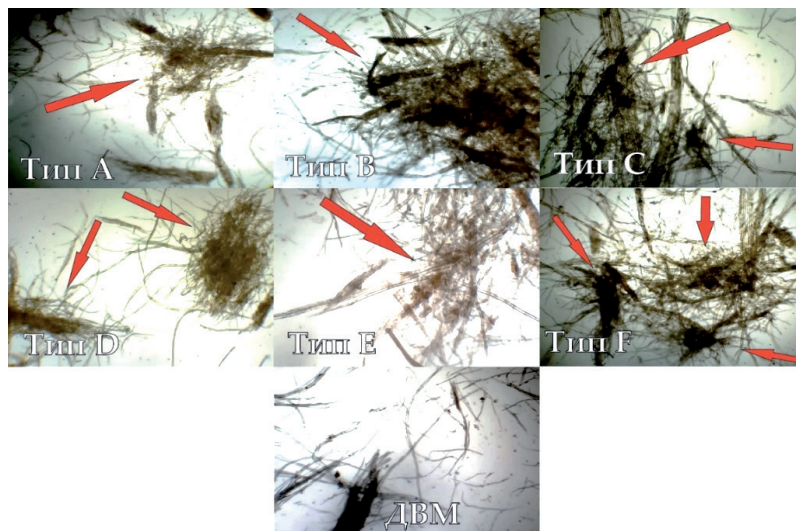
3.1. ВЛИЯНИЕ НА РЕЖИМА НА ХИДРОЛИЗА ВЪРХУ ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА РЕЦИКЛИРАНИТЕ ВЛАКНА И ОТПАДНИТЕ ВОДИ

Данните за фракционния състав на рециклираните, при различни режими на хидролиза, влакна и влакната от промишлената дървесновлакнеста маса, са представени на Фиг. 1.



Фиг. 1. Фракционен състав на рециклирани влакна и на влакна от промишлено произведена дървесновлакнеста маса

Микроскопските изображения на рециклираните влакна и тези от заводската дървесновлакнеста маса, са представени на Фиг. 2.



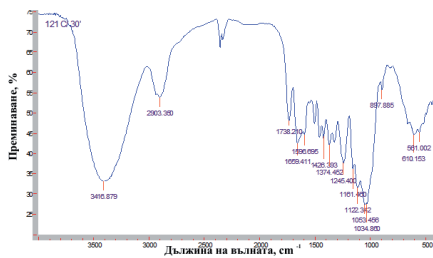
Фиг. 2. Микроскопски снимки (x 32) на рециклирани влакна и такива от промишлено произведена маса

Химичната потребност от кислород (ХПК) на отпадните води, получени при различните режими на хидротермична хидролиза, е представена в Табл. 5.

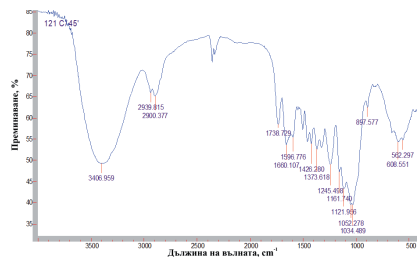
Таблица 5. Химична потребност от кислород (ХПК) на отпадните води, получени при различни режими на хидролиза.

Тип на влакната	Температура на хидротермичната хидролиза $T, ^\circ\text{C}$	Продължителност на хидротермичната хидролиза τ, min	ХПК, mg.l^{-1}
Тип А	121	30	1838
Тип В	121	45	1880
Тип С	121	60	1930
Тип D	134	30	2568
Тип E	134	45	2830
Тип F	134	60	3020

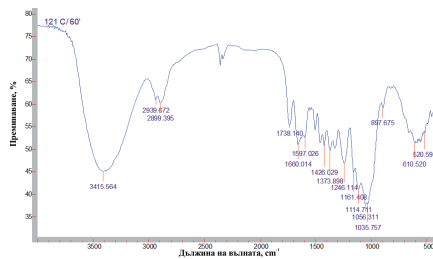
Функционалните групи при рециклираните влакна и тези от индустриалната маса, определени чрез инфрачервена спектроскопия (FTIR – Fourier-Transform Infrared Spectroscopy) са представени на Фиг. 3.



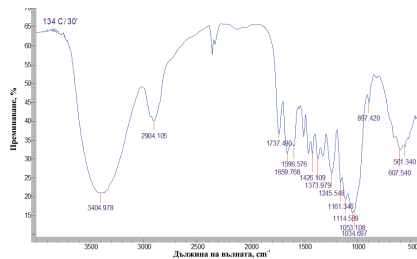
а)



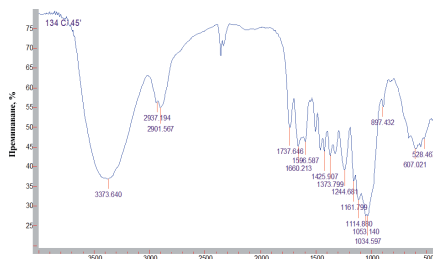
б)



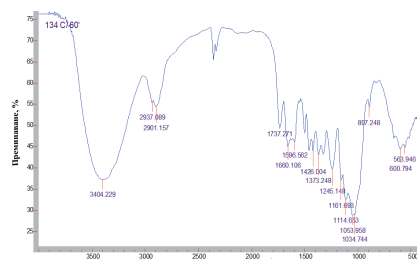
в)



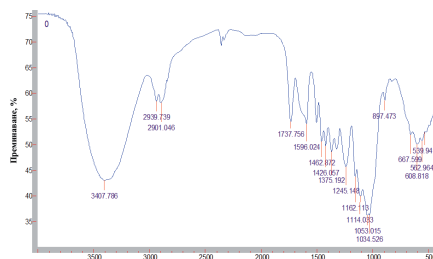
г)



д)



е)



ж)

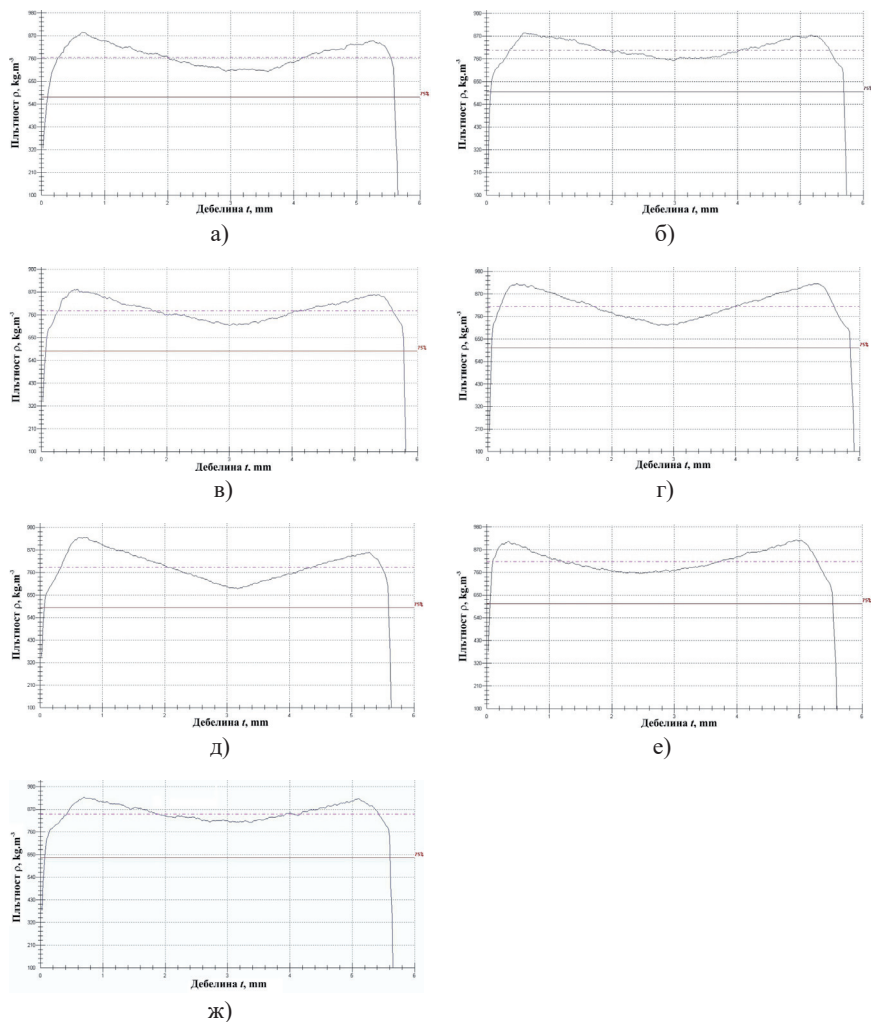
Фиг. 3. Функционални групи при рециклирана и заводско произведена маса:
а) влакна тип А; б) влакна тип В; в) влакна тип С; г) влакна тип Д ;
д) влакна тип Е ; е) влакна тип F; ж) дървесновлакниста маса.

Получените резултати показват, че при избраните режими на хидролиза не се наблюдава пълно извличане на КФС, а вместо това – до разрушаване на компонентите на смолата, които се разпадат на първични аминогрупи. При избраните режими на хидротермична хидролиза не е засегната и основната химична структура на дървесината като се установи, че съдържанието на пентозани в рециклираните влакна на практика е еднакво и е сходно с това на влакната от промишлената дървесновлакнеста маса. Така може да се достигне до заключението, че при температури на хидротермична хидролиза в диапазона от 121 до 134°C и продължителност на процеса от 30 до 60 минути се запазва химическият състав на дървесните влакна. Това води до извода, че интегрирането на получените рециклирани влакна в общ производствен поток с термомеханичната дървесновлакнеста маса би било лесно осъществимо.

При изследването на фракционния състав на рециклираните влакна, получени при различни режими на хидролиза, не са установени значими разлики. Установи се, че дължината на влакната от рециклираната маса (при всички изследвани режими на хидролиза) е по-малко, отколкото тази в дървесновлакнестата маса от натурална дървесина. В масата от рециклирани влакна се установи наличие на структури (снопове) с неправилна форма и малка стройност, които могат значително да влошат показателите на рециклираните плочи от дървесни влакна със средна плътност. В допълнение при проведеното изследване се установи, че ХПК на отпадните води се повишава значително при увеличаване на температурата на хидротермична хидролиза, тоест повишаването на температурата на хидролиза над 121°C води до увеличено замърсяване на отпадъчните води и следователно до намален количествен добив. При положение, че не са засегнати хемицелулозите и не се установява извличане на КФС, то увеличеното ХПК следва да се дължи на водоразтворимите екстракти от рециклируемите плочи. Като основен извод и новост на изследването може да се посочи, че при предварителната подготовка на плочите от дървесни влакна със средна плътност с размери, подобни на тези на технологичните трески, не се препоръчва повишаване на температурата на хидролиза над 121°C и продължителност на хидротермична хидролиза над 30 min. Това обаче трябва да бъде допълнително потвърдено чрез изследване на показателите на плочи от рециклирани при различни режими на хидролиза влакна.

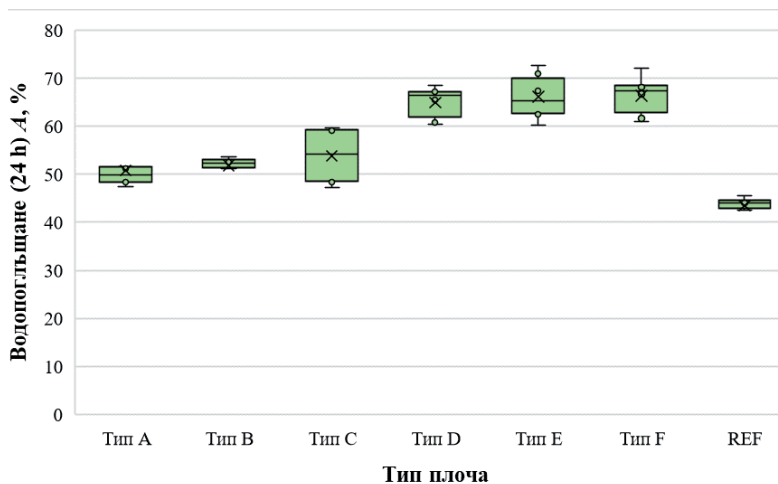
3.2. ВЛИЯНИЕ НА РЕЖИМА НА ХИДРОЛИЗА ВЪРХУ ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА ПЛОЧИ ОТ РЕЦИКЛИРАНИ ВЛАКНА

Профилът на плътността на различните плочи от дървесни влакна е представен на Фиг. 4.



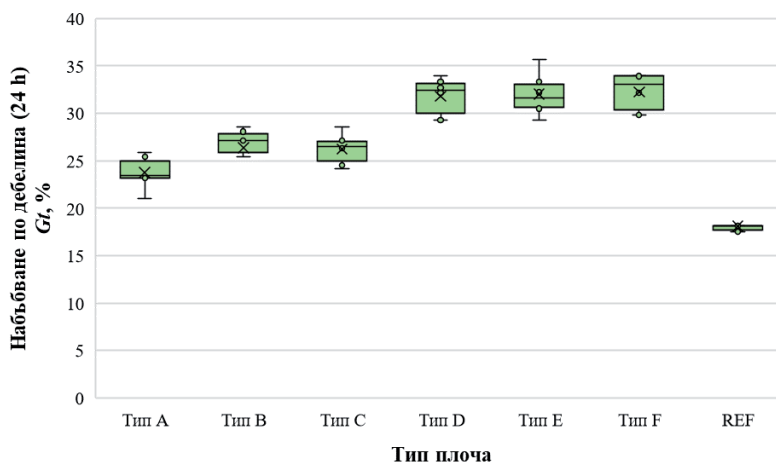
Фиг. 4. Профил на плътността на плочите от дървесни влакна: а) плоча тип А; б) плоча тип В; в) плоча тип С; г) плоча тип D; д) Плоча тип Е; е) плоча тип F; ж) REF (контролна плоча)

Водопогълъщането на лабораторните плочи от рециклирани влакна и индустриална дървесновлакнеста маса е представено на Фиг. 5.



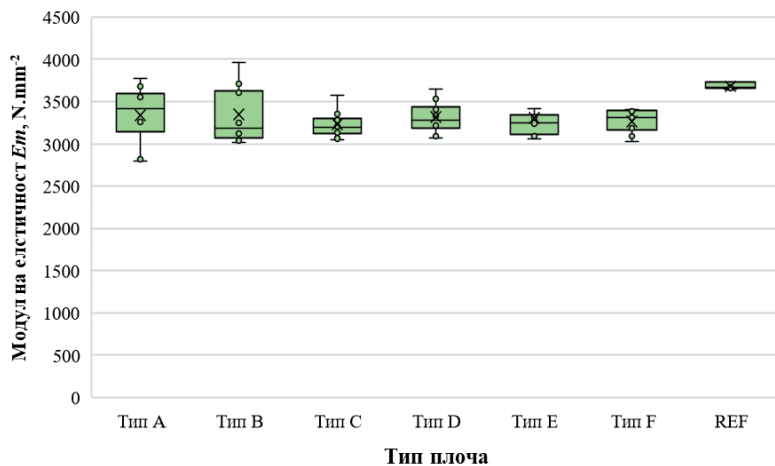
Фиг. 5. Водопогълъщане (24 h) на плочи от рециклирани влакна и промишлена дървесновлакнеста маса

Данните за набъбването по дебелина на плочите са представени на Фиг. 6.



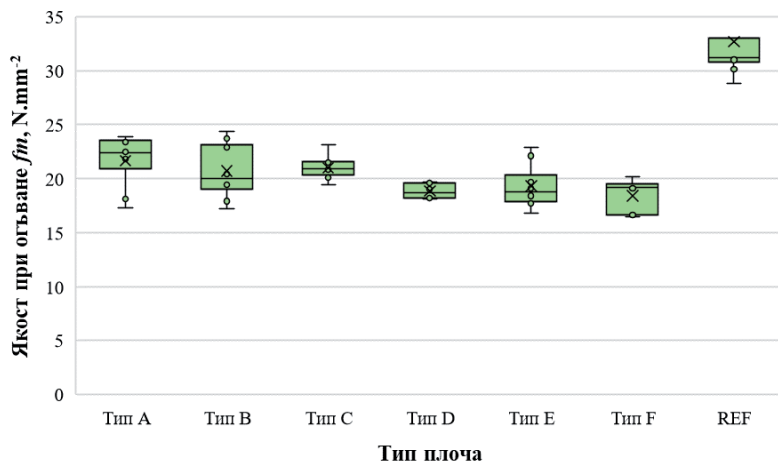
Фиг. 6. Набъбване по дебелина (24 h) на плочи от рециклирани влакна и промишлена дървесновлакнеста маса

Модулът на еластичност на плочите от рециклирани влакна е представен на Фиг. 7.



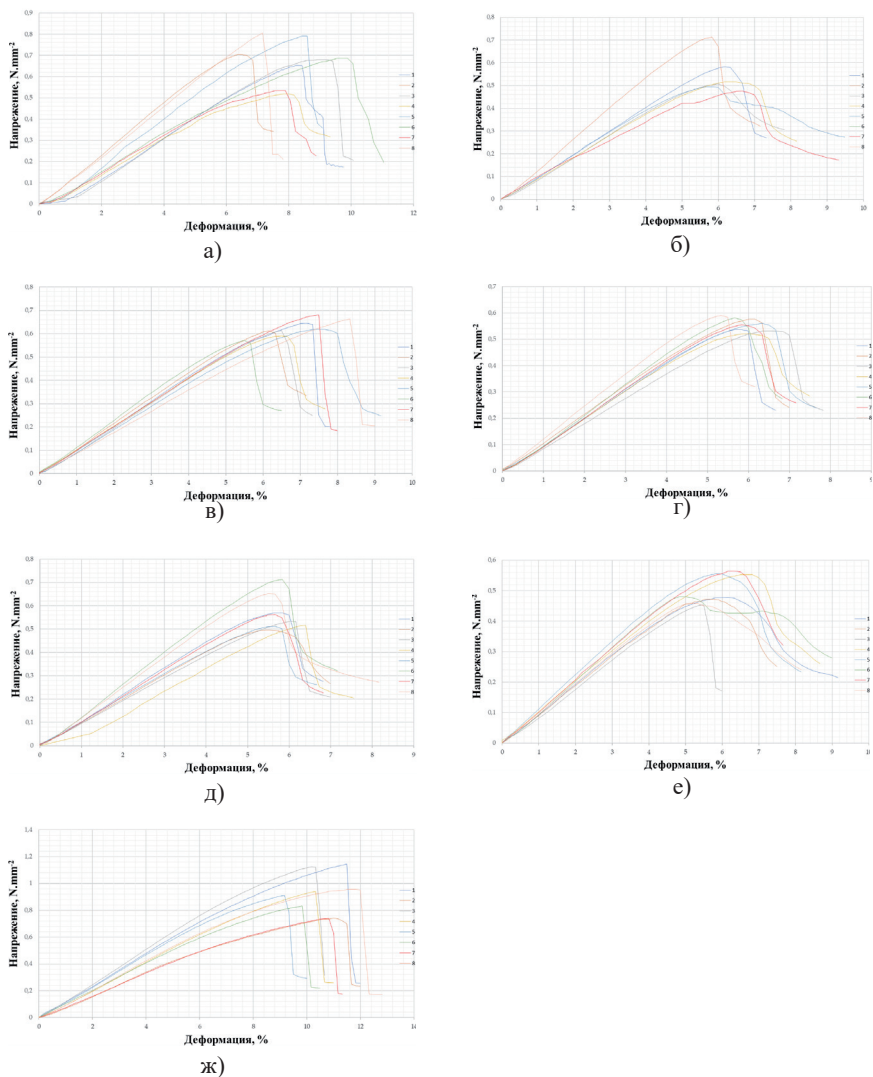
Фиг. 7. Модул на еластичност на плочи от рециклирани влакна и промишлена дървесновлакнеста маса

Якостта при огъване на плочите е представена на Фиг. 8.



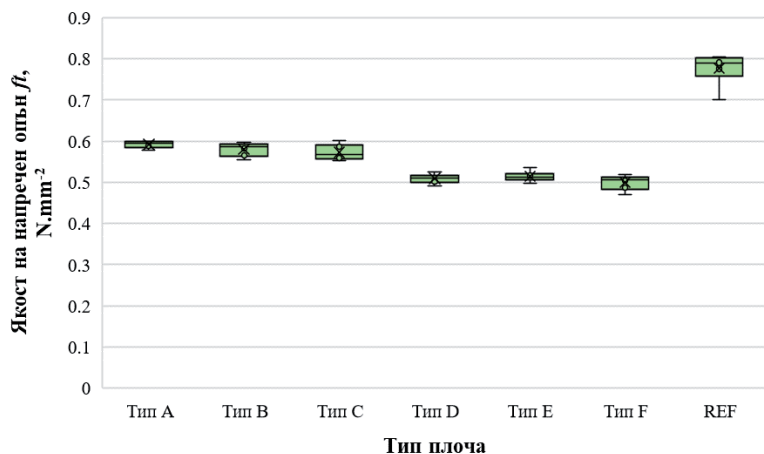
Фиг. 8. Якост при огъване на плочи от рециклирани влакна и промишлена дървесновлакнеста маса

Деформационното поведение при огъване на отделните плочи е дадено на Фиг. 9.



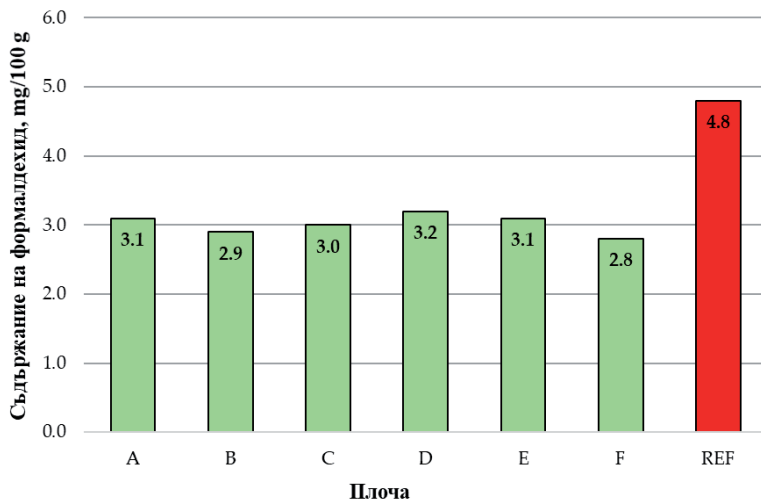
Фиг. 9. Якост при огъване на плочи от рециклирани влакна и промишлена дървесновлакнеста маса: а) плоча тип А; б) плоча тип В; в) плоча тип С; г) плоча тип D; д) плоча тип Е; е) плоча тип F; ж) REF (контролна плоча)

Якостта на напречен опън (разлепване) при различните плочи е представена на Фиг. 10.



Фиг. 10. Якост на напречен опън (разлепване) на плочи от рециклирани влакна и промишлена дървесновлакнеста маса

Емисиите на формалдехид, определени по перфораторния метод на лабораторните плочи, са представени на Фиг. 11.



Фиг. 11. Свободен формалдехид в плочи от рециклирани влакна и промишлена дървесновлакнеста маса

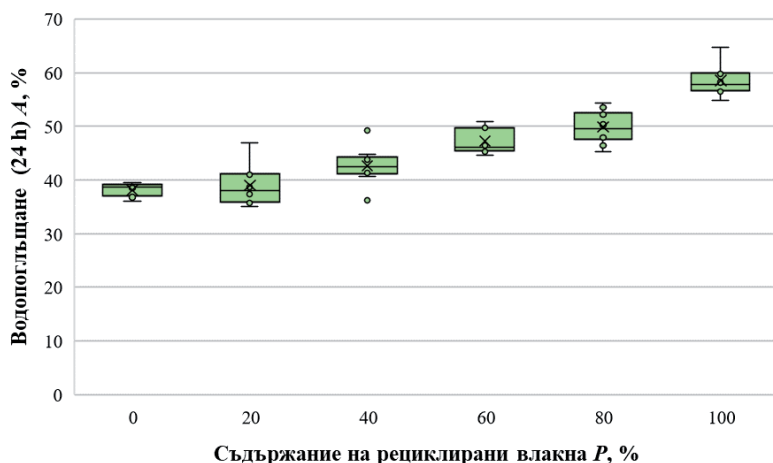
В резултат от проведеното изследване относно влиянието на режима на хидротермична хидролиза върху показателите на плочи от рециклирани влакна се установи, че при изследвания диапазон на изменения на температурата и продължителността на хидролиза, този тип плочи имат с от 9,3 до 31% по-лоши физико-механични показатели в сравнение с плочите произведени от промишлена дървесновлакнеста маса. В най-висока степен плочите от рециклирани влакна запазват своя модул на еластичност, а най-значително влошаване се наблюдава в тяхната якост на напречен опън (разлепване). Това е обяснимо, тъй като рециклираните влакна запазват своята коравина, която се предава и в модула на еластичност на плочите, получени от тях. Значителният спад в якостта на напречен опън се дължи на намалената стройност на рециклираните влакна и на наличието на сферични структури в тях. Това от своя страна води до намаляване както на адхезионните, така и на кохезионните връзки в плочите. Въпреки това плочите от рециклирани влакна имат значително пониски емисии на формалдехид в сравнение с плочата от промишлена дървесновлакнеста маса, което се дължи на наличието на първични амини в рециклираните влакна. Не се отчита последващо понижаване на съдържанието на формалдехид с увеличаване на температурата или продължителността на хидролиза. Това показва, че деструкцията на смолата приключва още при температура на хидролиза от 121°C и продължителност на хидролиза от 30 min, като последващите изменения в рециклираните влакна се дължат на промяна в техни други компоненти.

Установено е, че значително влияние върху физико-механичните показатели на плочите от рециклирани влакна оказва температурата на хидролиза. С увеличаване на температурата на хидролиза над 121°C не само не се наблюдава подобряване в показателите на плочите, а напротив – те се влошават. Тъй като не е отчетено изменение в съдържанието на пентозани, то влошаването на показателите на плочите вероятно се дължи на извличането на екстрактни вещества. Възможно обяснение е отделяне на танините от суровинния материал, която е със значително съдържание на цер, в резултат на хидролизата. Но тази хипотеза не е изследвана в настоящата работа.

В резултат от изследването като оптимални параметри на режима са определени температура 121°C и продължителност 30 min. Особено обнадеждаващо е, че не се отчита значителна разлика в профила на плътността на плочите от рециклирани влакна и промишлена дървесновлакнеста маса. Въпреки това, поради значителното влошаване в физико-механичните показатели на плочите, не се препоръчва производство на плочи изцяло от рециклирани влакна.

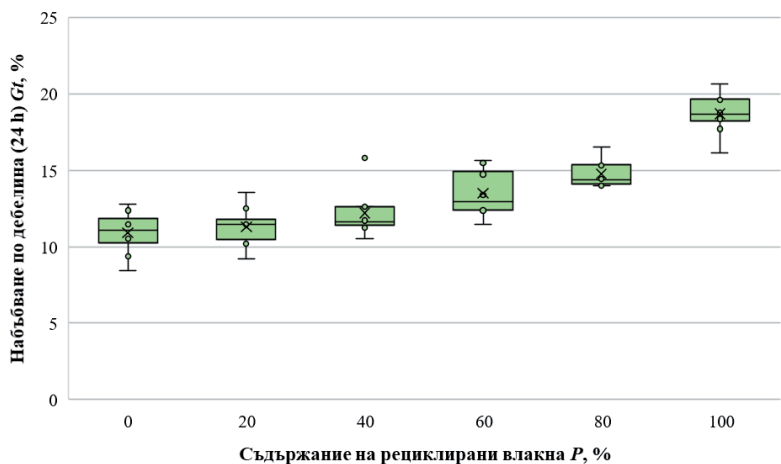
3.3. ВЛИЯНИЕ НА СЪДЪРЖАНИЕТО НА РЕЦИКЛИРАНИ ВЛАКНА ВЪРХУ ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА ПЛОЧИТЕ

Изменението на водопоглъщането на плочите в зависимост от съдържанието на рециклирани влакна е представено на Фиг. 12.



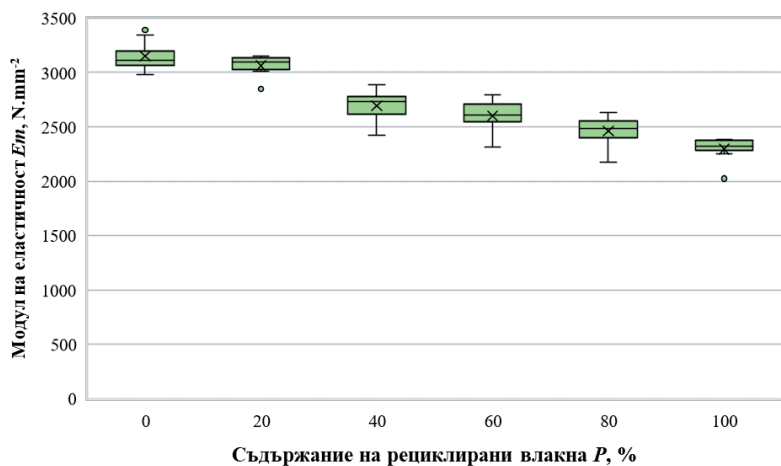
Фиг. 12. Водопоглъщане на плочи с различно съдържание на рециклирани влакна

Данните за набъбването по дебелина на плочите с различно участие на рециклирани влакна са представени на Фиг. 13.



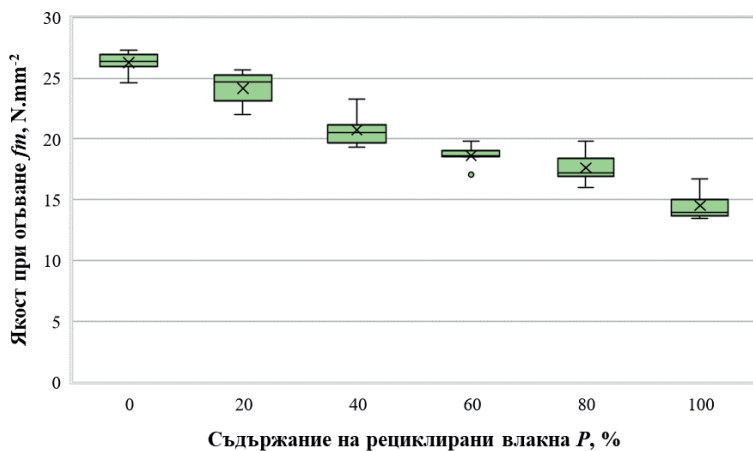
Фиг. 13. Набъбване по дебелина на плочи с различно съдържание на рециклирани влакна

Изменението на модула на еластичност на плочите в зависимост от тяхното съдържание на рециклирани влакна е представено на Фиг. 14.



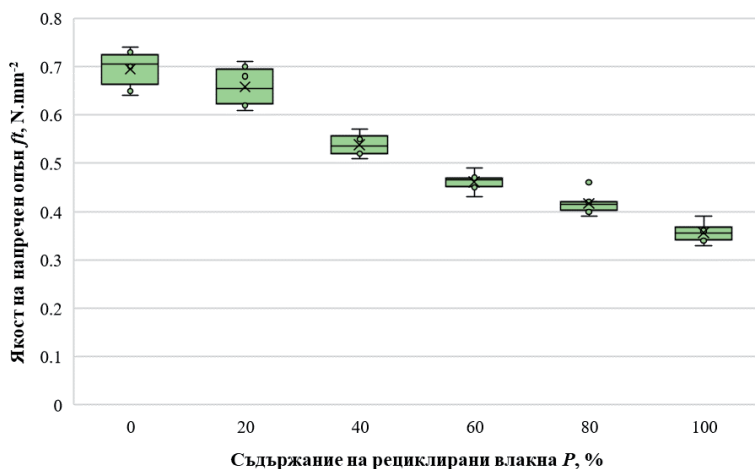
Фиг. 14. Модул на еластичност на плочи с различно съдържание на рециклирани влакна

Данните за якостта при огъване на плочите с различно участие на рециклирани влакна са представени на Фиг. 15.



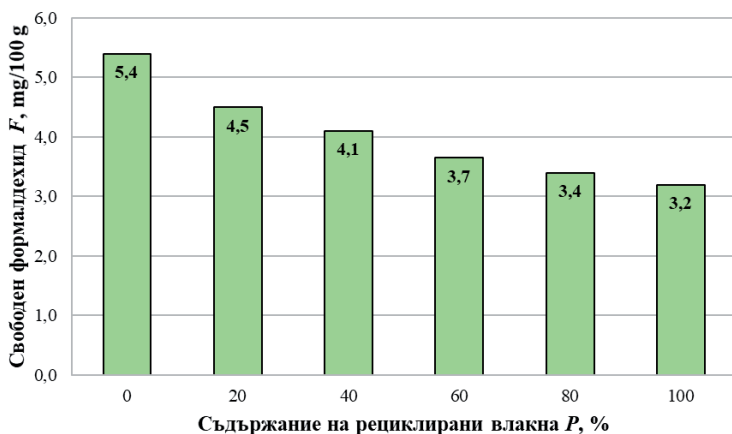
Фиг. 15. Якост при огъване на плочи с различно съдържание на рециклирани влакна

Влиянието на съдържанието на рециклирани влакна върху якостта на напречен опън (разлепване) на плочите е представено на Фиг. 16.



Фиг. 16. Якост на напречен опън (разлепване) на плочи с различно съдържание на рециклирани влакна

Изменението на съдържанието на свободен формалдехид в плочите с различно съдържание на рециклирани влакна е представено на Фиг. 17.



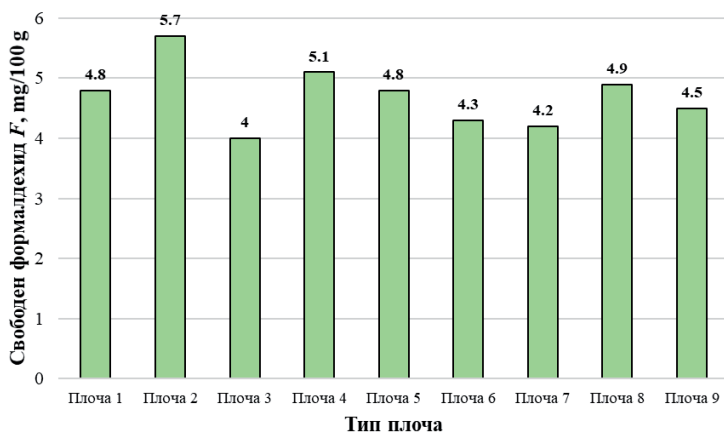
Фиг. 17. Съдържание на свободен формалдехид в плочи с различно съдържание на рециклирани влакна

Проведените изследвания за влиянието на съдържанието на рециклирани влакна върху показателите на плочите показват значително влошаване във всички експлоатационни показатели при пълно заместване на натуралните с рециклирани влакна. Така това влошаване при модула на еластичност е от 1,37 пъти, при якостта при огъване – от цели 1,81 пъти, при водопоглъщането – от 1,71 пъти, при набъбването по дебелина – от 1,54 пъти, а при якостта на напречен опън – от 1,94 пъти. Това предполага, че не е обосновано плочите да се произвеждат от изцяло от рециклирани влакна. Много обнадеждаващо е, че съдържанието на свободен формалдехид на плочите с рециклирани влакна също спада 1,68 пъти. Както бе изяснено по-горе в работата това се дължи на наличието на първични амини, продукт от деградацията на КФС. Друг основен извод е, че влошаването в показателите на плочите не е равномерно с добавяне на рециклирани влакна. При до 20% съдържание на рециклирани влакна тези плочи в значителна степен запазват своите показатели, като за сметка на това съдържанието на формалдехид спада 1,2 пъти. Значително влошава-

не в показателите на плочите се отбелязва при увеличаване на съдържанието на рециклирани влакна от 20 на 40%, след което се отбелязва относително равномерно влошаване с увеличаване на съдържанието на рециклирани влакна. Това налага извода за по-детайлно изследване на влиянието на съдържанието на влакна в диапазона до 40 – 60%. Уместен подход би бил да се установи и влиянието на съдържанието на карбамидформалдехидна смола, тъй като с увеличаване на нейното съдържание би било възможно частично да се компенсира негативното влияние на рециклираните влакна. Изследванията показват, че увеличаването на съдържанието на карбамидформалдехидна смола е възможно и поради действието, като акцептори на формалдехид, на първичните амини в рециклираните влакна.

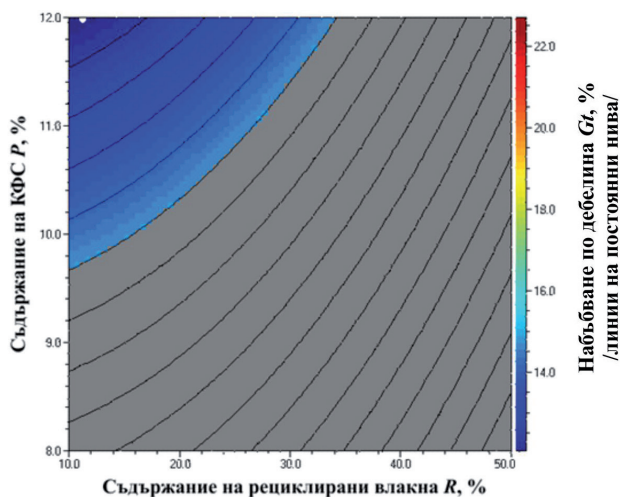
3.4. ВЛИЯНИЕ НА СЪДЪРЖАНИЕТО НА РЕЦИКЛИРАНИ ВЛАКНА И КАРБАМИДФОРМАЛДЕХИДНА СМОЛА ВЪРХУ ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА ПЛОЧИТЕ

Резултатите за съдържанието на свободен формалдехид, в различните плочи, са представени на Фиг. 18.



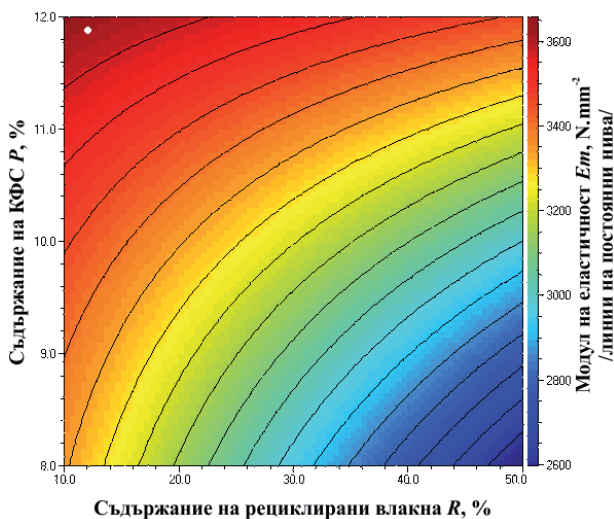
Фиг. 18. Съдържание на свободен формалдехид в плочи с различно съдържание на рециклирани влакна и карбамидформалдехидна смола

На Фиг. 19 е представена зависимостта на набъбването по дебелина от съдържанието на рециклирани влакна и съдържанието на карбамидформалдехидна смола.



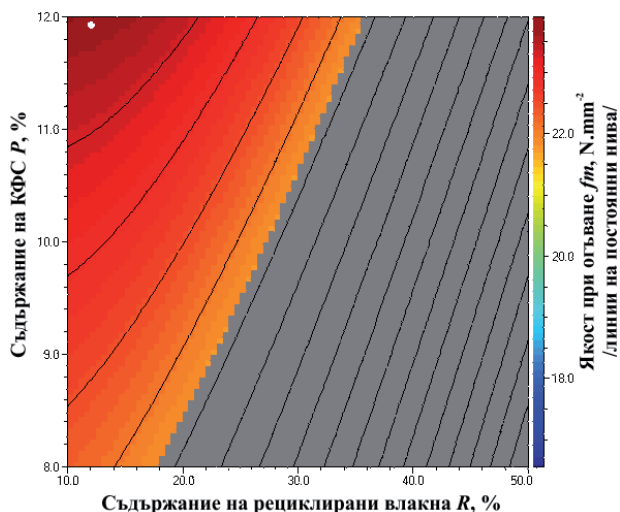
Фиг. 19. Зависимост на набъбването по дебелина от съдържанието на рециклирани влакна и на карбамидформалдехидна смола

Зависимостта на модула на еластичност от съдържанието на рециклирани влакна и на карбамидформалдехидна смола в графичен вид е представена на Фиг. 20.



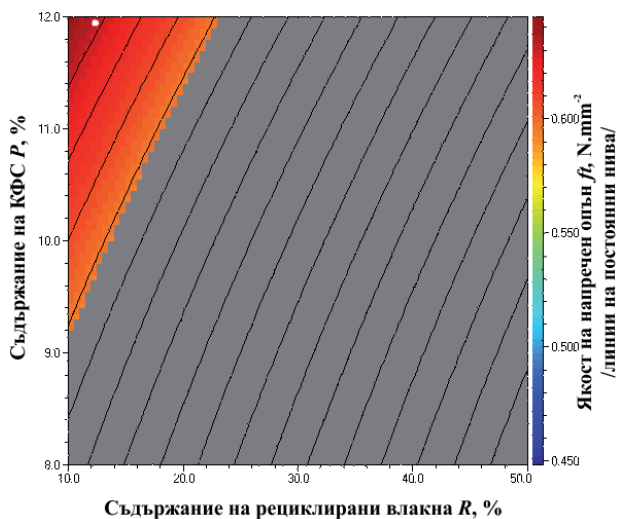
Фиг. 20. Зависимост на модула на еластичност от съдържанието на рециклирани влакна и на карбамидформалдехидна смола

Зависимостта на якостта при огъване от съдържанието на рециклирани влакна и на карбамидформалдехидна смола е представена в графичен вид на Фиг. 21.



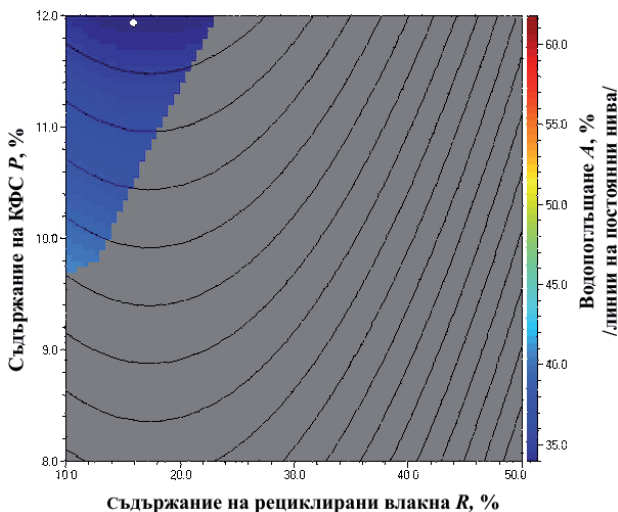
Фиг. 21. Зависимост на якостта при огъване от съдържанието на рециклирани влакна и на карбамидформалдехидна смола

Зависимостта на якостта на напречен опън от съдържанието на рециклирани влакна и на карбамидформалдехидна смола е представена в графичен вид на Фиг. 22.



Фиг. 22. Зависимост на якостта на напречен опън от съдържанието на рециклирани влакна и на карбамидформалдехидна смола

Зависимостта на водопоглъщането от съдържанието на рециклирани влакна и на карбамидформалдехидна смола е представена в графичен вид на Фиг. 23.



Фиг. 23. Зависимост на водопоглъщането от съдържанието на рециклирани влакна и на карбамидформалдехидна смола

При анализ на Фиг. 23, на която са нанесени ограниченията от изискванията към показателите на плочите от дървесни влакна с общо предназначение и употреба в суха среда се достига до извода, че максималното съдържание на рециклирани влакна е до 24%, като при това в този случай съдържанието на карбамидформалдехидна смола следва да е най-малко 12%. При 10% съдържание на рециклирани влакна, плочи отговарящи на изискванията на стандарта може да се получат при минимално съдържание на карбамидформалдехидна смола от 9,8%.

3.5. ОБОБЩЕНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ ПРОВЕДЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

В резултат от проведените експериментални изследвания относно влиянието на режима по хидролиза върху показателите на рециклираните влакна са установени следните по-важни резултати:

1. При температури на хидротермична хидролиза от 121°C (налягане на наситена водна пара от 0,2 МПа) до 134°C (налягане на наситена водна пара от 0,3 МПа) и продължителност на процеса от 30 до 60 min, не се наблюдава пълно извличане (деструкция) на карбамидформалдехидната смола, но тя се разрушава чрез разпадане до първични амини и други функционални групи.
2. При температури на хидротермична хидролиза от 121°C (налягане на наситена водна пара от 0,2 МПа) до 134°C (налягане на наситена водна пара от 0,3 МПа) и продължителност на процеса от 30 до 60 min, не се засягат пентозаните в дървесината, не се променя основният химичен състав на дървесината. Това означава, че интегрирането на получените рециклирани влакна в общ производствен поток с термомеханичната дървесновлакнеста маса би било лесно осъществимо.
3. Рециклираните влакна са с по-малка дължина от тези в промишлените влакна, като в масата от рециклирани влакна има наличие на структури (снопове) с неправилна форма и малка стройност, които могат значително да влошат показателите на рециклираните плочи от дървесни влакна.
4. Повишаването на температурата на хидролиза над 121°C води до увеличено замърсяване на отпадъчните води и сле-

дователно до намален количествен добив. Това е причина да не се препоръчва повишаване на температурата на хидролиза над 121°C и на продължителност на хидротермична хидролиза над 30 min.

В резултат от проведените експериментални изследвания по отношение влиянието на режима на хидролиза върху изследваните показатели на плочи от рециклирани влакна, са установени следните по-важни резултати:

1. Съставените изцяло от рециклирани влакна имат с от 9,3 до 31% по-лоши физико-механични показатели в сравнение с плочите, които са произведени от промишлена дървесновлакнеста маса.
2. Произведените от рециклирани влакна в най-висока степен запазват модула си на еластичност, докато най-значително се влошава якостта им на напречен опън (разлепване);
3. Плочите от рециклирани влакна имат профил на плътността в значителна степен близък до този на плочите от промишлена дървесновлакнеста маса.
4. При плочите от рециклирани влакна съдържанието на свободен формалдехид е по-ниско в сравнение с това при плочите от промишлена дървесновлакнеста маса. Това се дължи на наличието на първични амини от деструкцията на карбамидформалдехидната смола в рециклираната маса, които имат действие на акцептори на формалдехид.
5. Температурата на хидролиза оказва значително влияние върху физико-механичните показатели на плочите от рециклирани влакна, като с увеличаване на температурата на хидролиза над 121°C не само не се наблюдава подобрение в показателите на плочите, а тъкмо обратното – наблюдава се влошаване.

В резултат от проведените експериментални изследвания относно влиянието на съдържанието на рециклирани влакна върху изследваните показатели на плочите са получени следните по-важни резултати:

1. При пълно заместване на натуралните с рециклирани влакна, физико-механичните характеристики се влошават от 1,37 до 1,94 пъти. Най-малко влошаване се наблюдава при моду-

ла на еластичност на плочите, а най-голямо – при якостта им на напречен опън.

2. Влошаването на показателите на плочите не е равномерно. Физико-механичните показатели на материалите се запазват в значителна степен, когато наличието на рециклирани влакна в съдържанието им е до 20%, а на натуралните – поне 80%.
3. Значително влошаване в показателите на плочите се наблюдава при увеличаване на съдържанието на рециклирани влакна от 20 на 40% и от 40 на 60%;
4. При рециклиране посредством хидротермична хидролиза при температура на процеса от 121°C и продължителност от 30 min, получените рециклирани плочи от дървесни влакна имат значително по-малко съдържание на свободен формалдехид в сравнение с тези, произведени от натурални влакна.

В резултат от проведените експериментални изследвания на зависимостта между съдържанието на рециклирани влакна и карбамидформалдехидна смола върху показателите на плочите, са получени следните по-важни резултати:

1. В процеса на производство на плочи с участие на рециклирани влакна съдържанието на КФС с ултра ниско моларно отношение може да бъде 12%.
2. Съдържанието на КФС следва да е минимум 9,6%, с цел изискванията по отношение на набъбването по дебелина да бъдат покрити.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В резултат от изпълнението на задачите, поставени в настоящия дисертационен труд е установено влиянето на режима на хидротермична хидролиза върху показателите на плочи от дървесни влакна със средна плътност, произведени с участието на рециклирани влакна. На тази основа е определен оптимален режим на хидротермично обработване при рециклиране, като са взети под внимание разходите за хидротермично обработване, замърсеността на отпадните води, определено с ХПК, и показателите на влакната.

При така определения оптимален режим на рециклиране с прилагане на хидротермично обработване са получени плочи в лабораторни условия с различно количество рециклирани влакна. Посредством това е определен оптимален диапазон за вариране на съдържанието на рециклирани влакна, при което не се наблюдава значителен спад в експлоатационните показатели на плочите от дървесни влакна със средна плътност. В опит да се увеличи съдържанието на рециклирани влакна и с оглед действието на тези влакна като акцептори на формалдехид се проведеха изследвания, целящи оптимизация на състава по отношение количество рециклирани влакна и карбамидформалдехидна смола.

С решаването на задачите и получените приноси в дисертационния труд в никакъв случай не се претендира за изчерпване на значимия въпрос относно рециклирането на този основен дървесен композитен материал – плочи от дървесни влакна със средна плътност. Основно достижение на работата е извеждане на оптимални режими по хидротермично обработване, доказването на действието на рециклираните влакна като акцептори на формалдехид и извеждане на оптимален състав на плочи от дървесни влакна, по отношение на съдържанието на рециклирани влакна и карбамидформалдехидна смола.

В резултат на проведените експериментални изследвания за влиянието на **някои технологични фактори върху експлоатационните показатели на плочи с участие на рециклирани дървесни влакна** са получени следните основни приноси от разработването на дисертационния труд.

Научни приноси:

1. Доказано е наличие в рециклираните влакна на първични амини, изпълняващи ролята на акцептори на формалдехид, в резултат от деструкцията на карбамидформалдехидните смоли, още при температура на хидротермична хидролиза от 121°C и продължителност на процеса от 30 min.

Научно-приложни приноси:

1. Определено е влиянието на режима по хидротермична хидролиза върху показателите на рециклираните дървесни влакна.

2. Установен е оптималният режим на хидротермична хидролиза по отношение на показателите на рециклираните влакна, който е при температура на процеса от 121°C и продължителност на процеса от 30 min.
3. Доказано е, че показателите на ПДВ със средна плътност се влошават значително при увеличаване на съдържанието на рециклирани влакна от 20 на 40% и от 40 на 60%.
4. Изведени са експериментално-статистически модели за влиянието на съдържанието на рециклирани влакна и карбамидформалдехидна смола върху физико-механичните показатели на ПДВ със средна плътност.
5. Установено е оптималното съотношение на съдържание на рециклирани влакна и карбамидформалдехидна смола с оглед показателите на ПДВ със средна плътност.

Приложни приноси:

1. Установено е, че при рециклиране посредством хидротермична хидролиза при температура на процеса от 121°C и продължителност от 30 min, получените ПДВ със средна плътност от рециклирани дървесни влакна имат значително по-малко съдържание на свободен формалдехид в сравнение с тези, произведени от натурални влакна.
2. Установено е, че показателите на плочите от дървесни влакна значително се влошават при увеличаване на съдържанието на рециклирани влакна от 20 на 40% и от 40 на 60%;
3. Установено е, че при производство на плочи с участие на рециклирани влакна, съдържанието на КФС с ултра ниско моларно отношение може да бъде 12%.
4. Установено е, че съдържанието на КФС следва да е минимум 9,6%, с цел постигане на изискванията по отношение на набъбването по дебелина на плочи от дървесни влакна със средна плътност.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Panchev, C.**, V. Savov. Recycling of Medium Density Fibreboards – A Review. – In: Innovations in Woodworking Industry and Engineering Design, 2022, 1 (21), 39 – 46. ISSN 1314-6149.
2. **Panchev, C.**, V. Savov. Effect of Hydrolysis Regime on the Stiffness and Bending Deformation of Recycled Medium-Density Fibreboards (rMDF). – In: Innovation in Woodworking Industry and Engineering Design, 2023, 24, Issue 2, 70 – 77. ISSN 1314-6149.
3. Savov, V., P. Antov, **C. Panchev**. M. A. R. Lubis, S. H. Lee, H. R. Taghiyari, M. Todorova, S. Petrin. Effect of Hydrolysis Regime on the Properties of Fibers Obtained from Recycling Medium-Density Fiberboards. – In: Fibers, 2023, 11, 64. ISSN 2079-6439. <https://doi.org/10.3390/fib11070064>. IF: 3.9 (2022); 5-Year Impact Factor: 4.0 (2022). SiteScore 7.0. Квартил Q1 (*Civil and Structural Engineering*).
4. Savov, V., P. Antov, **C. Panchev**. M. A. R. Lubis, H. R. Taghiyari, S. H. Lee, L. Krišťák, M. Todorova. The Impact of Hydrolysis Regime on the Physical and Mechanical Characteristics of Medium-Density Fiberboards Manufactured from Recycled Wood Fibers. – In: Fibers, 2023, 11, 103. ISSN: 2079-6439. <https://doi.org/10.3390/fib11120103>. IF 3.9; CiteScore 7.0; квартал Q1 (*Civil and Structural Engineering*).

EFFECT OF SOME TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE PROPERTIES OF PANELS WITH PARTICIPATION OF RECYCLED FIBRES

The present work studied the effect of some factors on the properties of recycled Medium-Density Fibreboard (rMDF) panels. For this purpose, hydrothermal hydrolysis of MDF panels, previously prepared on samples with dimensions similar to those of pulp chips, was carried out. The influence of the hydrolysis regimes on the properties of the recycled fibres, wastewater, and resulting panels was investigated. On this basis, an optimal regime for hydrolysis was determined. In laboratory conditions, rMDF panels with different amounts of recycled fibres were fabricated. In this way, a limited range of recycled fibre content has been determined. A two-factor study was carried out to study the possibility of increasing the content of recycled fibres while increasing the content of urea-formaldehyde (UF) resin. On this basis, the composition of rMDF produced with UF resin was optimised.

As a result of the conducted research, conclusions and recommendations were drawn, which fulfilled the purpose of the work, namely **to investigate and establish the effect of some technological factors on the properties of rMDF panels.**