

**«Костромской государственный университет»  
Институт дизайна и технологий  
Кафедра лесозаготовительных и деревоперерабатывающих  
производств**

# **ТЕХНОЛОГИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ**

Титунин Александр Андреевич

Научный руководитель:  
Доктор технических наук, профессор  
Чубинский Анатолий Николаевич

Кострома, 2022

# **ВЗАИМОСВЯЗЬ РАБОТЫ С ПРОГРАММНЫМИ ЗАДАЧАМИ**

**Стратегия развития лесного  
комплекса Российской Федерации  
до 2030 года**

**Стратегии развития  
промышленности строительных  
материалов и индустриального  
домостроения на период до 2020 г. и  
дальнейшую перспективу до 2030 г.**

**Стратегия развития  
промышленности по обработке,  
утилизации и обезвреживанию  
отходов производства и  
потребления на период до 2030 г.**

**Энергетическая стратегия  
России  
на период до 2030 года  
«О выбросах парниковых  
газов»**

**№296-ФЗ от 02.07.2021**

## **ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ**

**Развитие жилищного строительства**

**Повышение эффективности  
использования потенциала древесных  
ресурсов**

**Создание эффективных материалов за счет  
вовлечения в производство отходов местной  
промышленности**

**Внедрение новых технологий и  
инновационных решений в области  
переработки древесины**

**К 2030 году производство деревянных  
домокомплектов в России составит 13,6 млн**

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

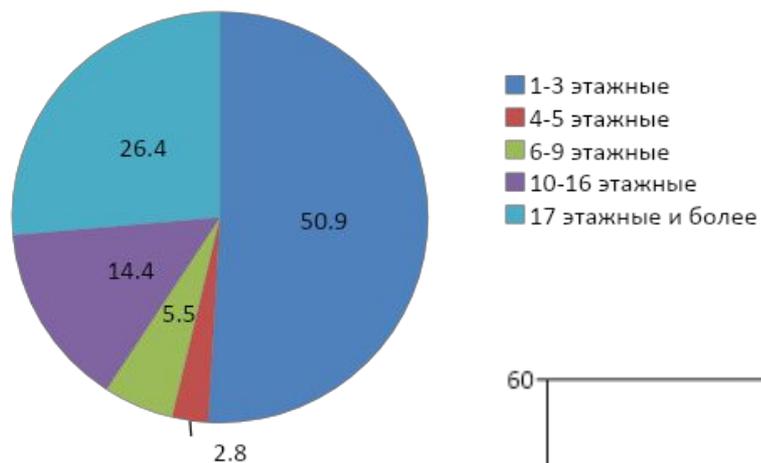
**Цель работы** – создание теплоизоляционного материала на основе стружки-отходов деревообрабатывающих производств и обоснование технологии его изготовления

### **Задачи:**

- обосновать структуру и целесообразность использования в составе композиционного материала стружки-отходов деревообрабатывающих производств;
- определить размерно-качественные характеристики древесной стружки, получаемой на деревообрабатывающих станках;
- установить взаимосвязь структуры и свойств получаемого композита;
- разработать математико-статистические модели, описывающие влияния технологических режимов производства на эксплуатационные показатели теплоизоляционного композита;
- разработать рекомендации по производству теплоизоляционных композитов для различных объемов древесных ресурсов и экономически обосновать целесообразность организации их серийного производства в условиях действующего предприятия

# Динамика строительства жилых домов

Общая площадь жилых домов



# Композиционные материалы на основе измельченной древесины

Строительные материалы на основе древесных отходов

Конструкционные материалы

Щепо-цементные блоки (арболит, Durisol и др.)

Цементно-стружечные и гипсо-стружечные плиты (ДСП, ГСП)

Плиты ОСП (OSB)

Теплоизоляционные материалы

Мягкие ДВП (софтборд, Steico)

Древесно-полимерные композиты (ДПК)

Цементно-стружечные плиты

Древесные ваты

Древесно-стружечные материалы

Древесно-стружечные плиты

Твердые древесноволокнистые плиты

Древесноволокнистая плиты средней плотности (МДФ)

Древесно-полимерные композиты

# Формулировка проблемы

Вид стружки

Различия по форме, размерам и фракционному составу стружки

Вид материалы матрицы

Требования по теплопроводности

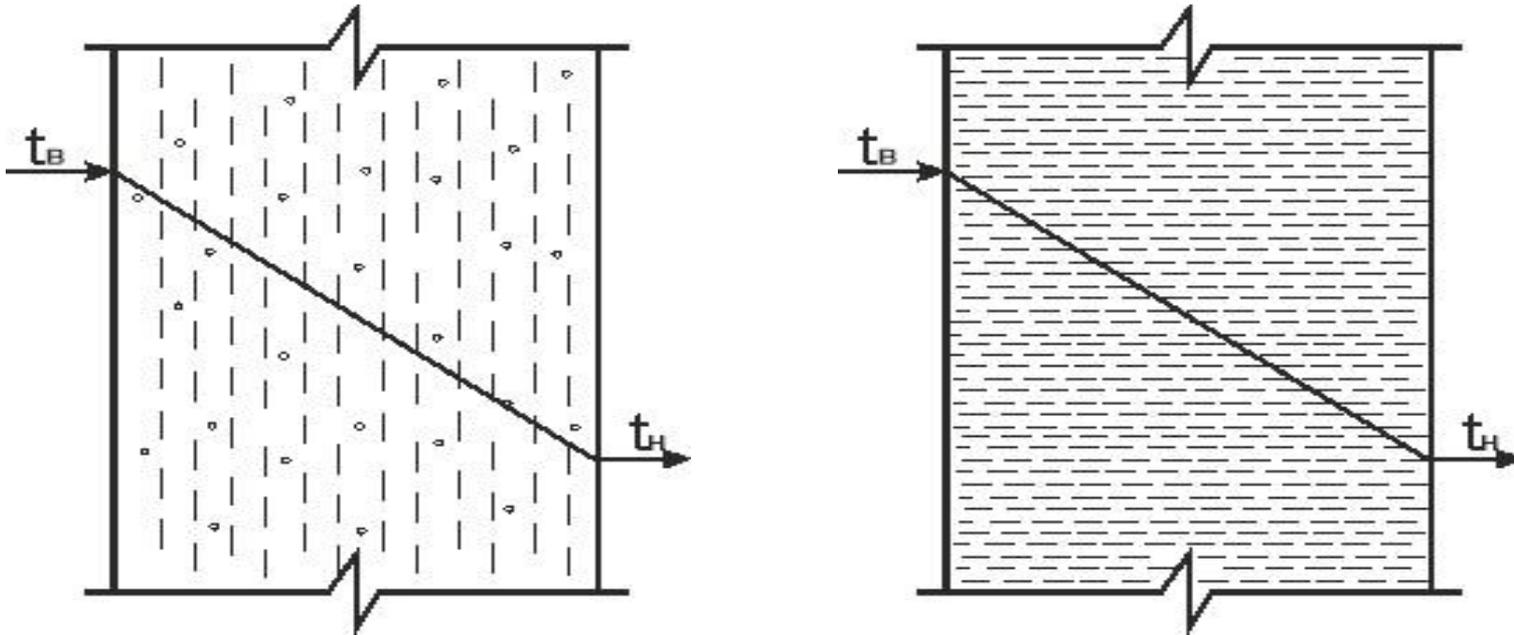
Получение композита

Требования по прочности

Управление процессом структурообразования

Рецептура и технологические режимы получения теплоизоляционного композита

# Структурная модель композита



Структурные модели композита: а – тепловой поток в композите плоского прессования (аналог ДСтП); б – тепловой поток в композите, полученном формованием (аналог арболита)

# Основные закономерности теплопроводности материалов из древесины

$$\overset{W}{q} = -\lambda \text{ grad } T. \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{др}} = \lambda_{\text{н}} \cdot K_{\rho} \quad (2)$$

$$\lambda'_{\text{др}} = K_x \cdot \lambda_{\text{н}} \cdot K_{\rho} \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{н}} = 0,00497 W + 0,1425 \quad (4)$$

$$K_{\rho} = 4,77 \cdot \rho^2 - 2,73 \cdot \rho + 1,19 \quad (5)$$

$$K_x = 1 + 1,2 \cos \varphi_i \quad (6)$$

где  $\lambda_{\text{н}}$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) в направлении поперек волокон при плотности древесины  $\rho_{\text{н}} = 500 \text{ кг/м}^3$ ;

$K_{\rho}$ ,  $K_x$  - коэффициенты, учитывающие плотность частиц древесины и их расположение по отношению к тепловому потоку.

W, T - соответственно влажность, % и температура древесины, °C;

$\rho$  - плотность древесины, г/см<sup>3</sup>.

# Основные закономерности теплопроводности

## материалов из древесины

$$R_{\kappa} = \frac{F_{\kappa}}{\frac{F_{\partial p}}{R_{\partial p}} + \frac{F_c}{R_c} + \frac{F_e}{R_e}} \quad (7) \quad \lambda_{\kappa} = \frac{\partial p \lambda_{\partial p} + V_c \lambda_c + V_e \lambda_e}{V_{\kappa}}, \quad (8)$$

$F_{\kappa}, F_{\partial p}, F_c, F_e$  – площадь сечения соответственно всего композита, древесного наполнителя, связующего и воздуха, м<sup>2</sup>;  $R_{\kappa}, R_{\partial p}, R_c, R_e$  – термическое сопротивление соответственно композита, древесного наполнителя, связующего и воздуха, м<sup>2</sup>·К/Вт.  $V_{\kappa}, V_{\partial p}, V_c, V_e$  – объем соответственно всего композита, древесного наполнителя, связующего и воздуха, м<sup>3</sup>;  $\lambda_{\kappa}, \lambda_{\partial p}, \lambda_c, \lambda_e$  – коэффициент теплопроводности композита, древесного наполнителя, связующего и воздуха.

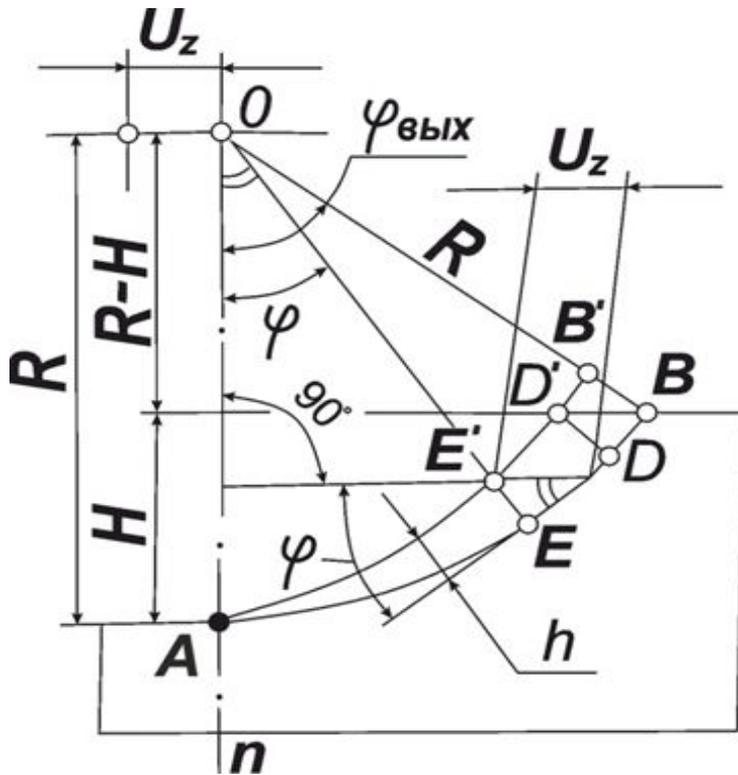
$$\lambda_{\text{эфф}} = \frac{2(1-n)\lambda_1 + (1+2n)\lambda_2}{(2+n) + (1-n)\lambda_2/\lambda_1} \quad (9) \quad \lambda = \lambda_{\text{св}} \left\{ \frac{V_1}{1-V_{\text{св}}} \left[ 1 - \frac{1-V_{\text{св}}}{\frac{1}{(1-\nu_1)} - \frac{V_{\text{св}}}{3}} \right] + \frac{V_2}{1-V_{\text{св}}} \left[ 1 - \frac{1-V_{\text{св}}}{\frac{1}{(1-\nu_2)} - \frac{V_{\text{св}}}{3}} \right] \right\} \quad (10)$$

$$\nu_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_{\text{св}}}; \quad \nu_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_{\text{св}}};$$

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности непрерывной (большей по объему) фазы, Вт/(м·К);  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности диспергируемой фазы, Вт/(м·К);  $n$  – массовая доля диспергируемой фазы,  $n \leq 0,4$ .

$\lambda, \lambda_{\text{св}}, \lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности композита, связующего, первого и второго наполнителя соответственно Вт/(м·К);  $V_{\kappa}, V_{\partial p}, V_c, V_e$  – объемные доли связующего, первого и второго наполнителя

# Расчет размеров стружки



$$h_{max} \approx U_z \sin \varphi_{\text{ВЫХ}} \quad (11)$$

$$h_{cp} = U_z \sin \varphi_{cp} = U_z \sin\left(\frac{\varphi_{\text{ВЫХ}}}{2}\right) \quad (12)$$

$$l = \frac{\pi R}{180} (\varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_{\text{ВХ}}) \quad (13)$$

где  $\varphi_{\text{ВЫХ}} = \arccos\left[\frac{R-H}{R}\right]$  – угол выхода, град;  
 $R$  – радиус резания, мм;  $H$  – глубина фрезерования, мм;  $h_{cp}$  – средняя толщина стружки, мм;  $U_z$  – подача на резец, мм;  
 $\varphi_{cp}$  – средний угол, град;  
 $\varphi_{\text{ВЫХ}}$  – угол выхода, град

$$l_{\text{стр}} = 18,2 \text{ мм} \quad h_{cp} = 0,05 \dots 0,15 \text{ мм}$$

# Зависимость прочности древесностружечных плит от размеров стружек

Толщина стружки, мм	Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Длина стружки, мм	Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Ширина стружки, мм	Предел прочности при статическом изгибе, кгс/см <sup>2</sup>
0,1	29,0	20	23,2	5	26,0
0,2	26,0	40	26,4	10	24,8
0,3	27,0	60	28,2	15	21,8
0,5	17,0	80	29,0	20	21,0
1,0	14,0	-	-	-	-

## Ограничения по размерам стружки

$$h_{max} = 0,5 \text{ мм}$$

$$l_{max} = 50-60 \text{ мм}, l_{opt} \leq 40 \text{ мм}$$

$$\frac{b}{l} \leq \frac{1}{6}; \frac{l}{h} \leq 60 \text{ (в}_H\text{) } 120 \text{ (н)}$$

$$\frac{b}{h} \leq 5 \text{ (в}_H\text{)}; \frac{b}{h} \leq 10 \text{ (н)}$$

Доля мелких частиц 12-15 % (фракция 1/0)

# Первый этап экспериментальных исследований



Стружка от станка  
ДС-7



Вид стружки от четырехсторонних  
станков

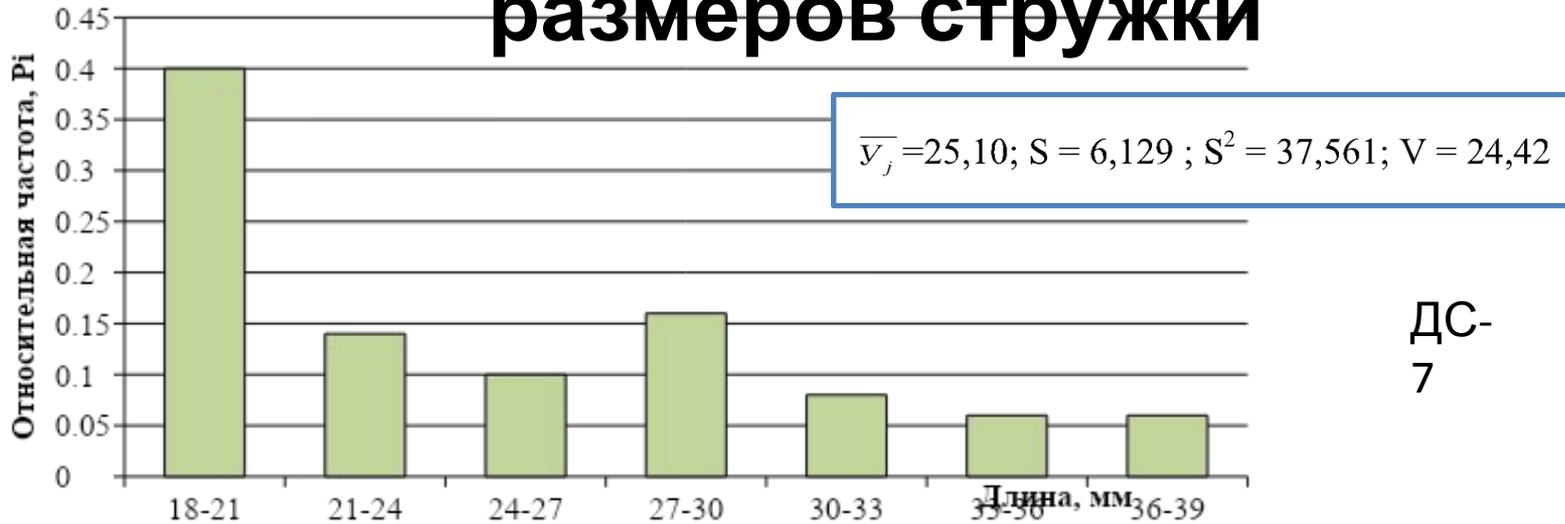
# Фракционный состав стружки

ДС-7	Остаток на ситах, %						
	-/8	8/5	5/2,5	2,5/1,6	1,6/0,71	0,71/0,25	0,25/0
Среднее	0,33	2,82	28,69	27,18	25,48	14,03	1,48
Ср.квадр.откл.	0,334	0,666	9,881	3,532	4,970	7,199	0,628
Дисперсия	0,112	0,443	97,627	12,477	24,697	51,828	0,394
Коэфф.вариации	102	23,65	34,44	12,99	19,51	51,3	42,55

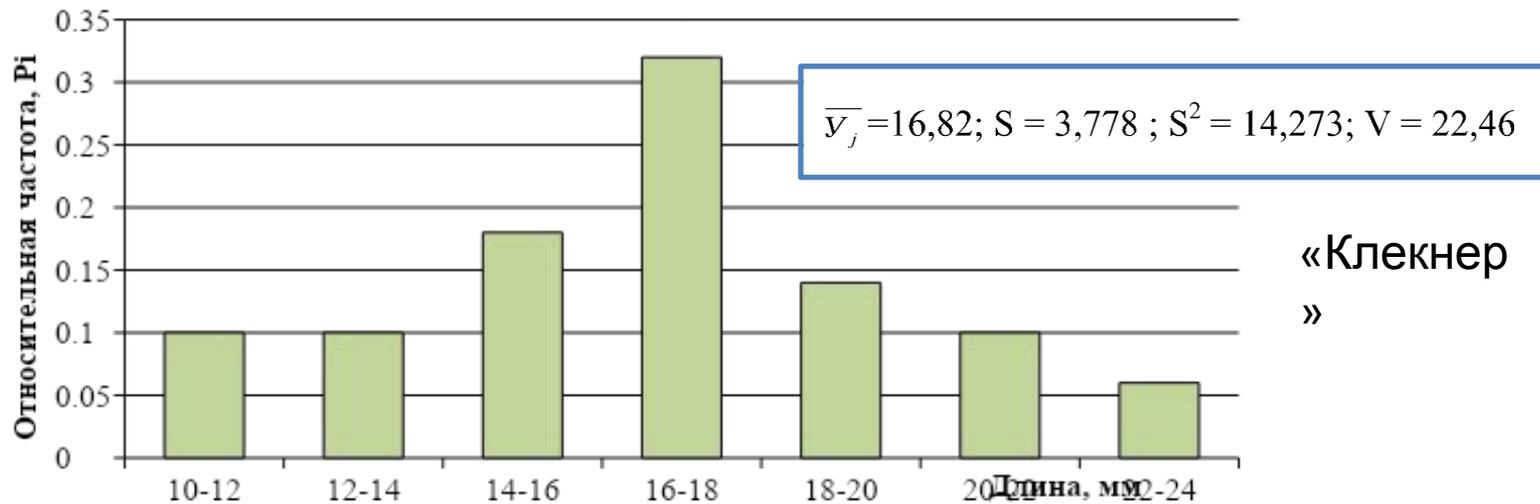
«Клекнер»	Остаток на ситах, %						
	-/8	8/5	5/2,5	2,5/1,6	1,6/0,71	0,71/0,25	0,25/0
Среднее	0,12	1,07	15,65	34,59	27,05	18,43	3,09
Ср.квадр.откл.	0,204	0,998	8,479	10,569	5,012	12,893	1,977
Дисперсия	0,042	0,997	71,900	111,707	25,120	166,239	3,907
Коэфф.вариации	174,65	93,32	54,17	30,55	18,53	69,97	63,90

«Beaver»	Остаток на ситах, %					
	-/10	10/7	7/5	5/2	2/0,5	0,5/0
Среднее	0,93	5,54	10,62	34,73	19,2	28,98
Ср.квадр.откл.	0,607	2,603	1,801	1,384	4,515	8,427
Дисперсия	0,368	6,775	3,243	1,916	20,384	71,010
Коэфф.вариации	65,34	46,97	16,95	3,99	23,51	29,08

# Статистические оценки параметров распределения размеров стружки



ДС-  
7

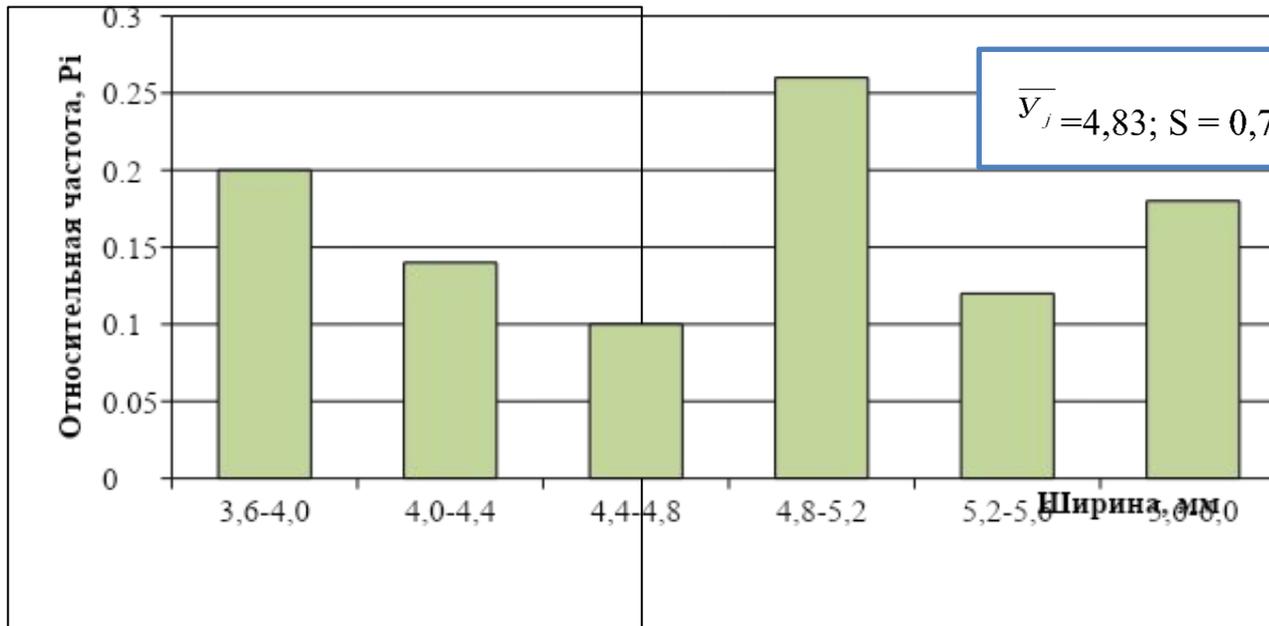


«Клекнер  
»

# Статистические оценки параметров распределения



ДС-  
7



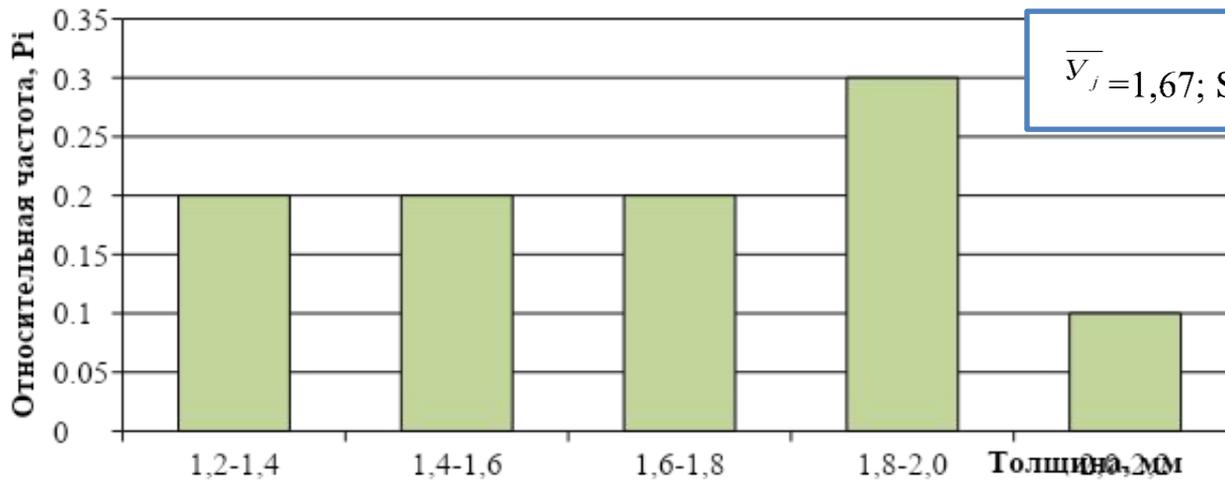
«Клекнер  
»

# Статистические оценки параметров распределения

## размеров стр



ДС-  
7



«Клекнер  
»

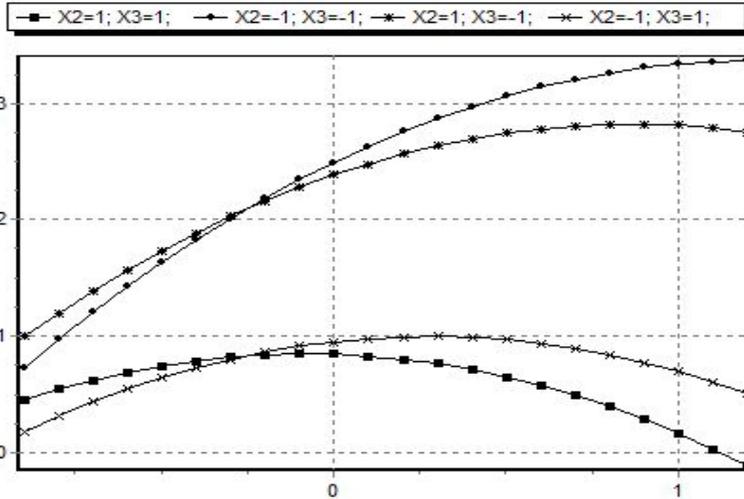
# Разработка состава и технологических режимов получения композитов на основе древесной стружки и карбамидоформальдегидного связующего

Наименование фактора	Обозначения уровней варьирования		Уровни варьирования			Интервал варьирования $\Delta_i$
	Натуральные	Кодированные	-1	0	+1	
1. Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	$X_1$	300	350	400	50
2. Удельная продолжительность прессования, мин/мм	$\tau$	$X_2$	0,3	0,35	0,4	0,05
3. Доля мелких частиц (по массе наполнителя)	$D$	$X_3$	0	0,2	0,4	0,2

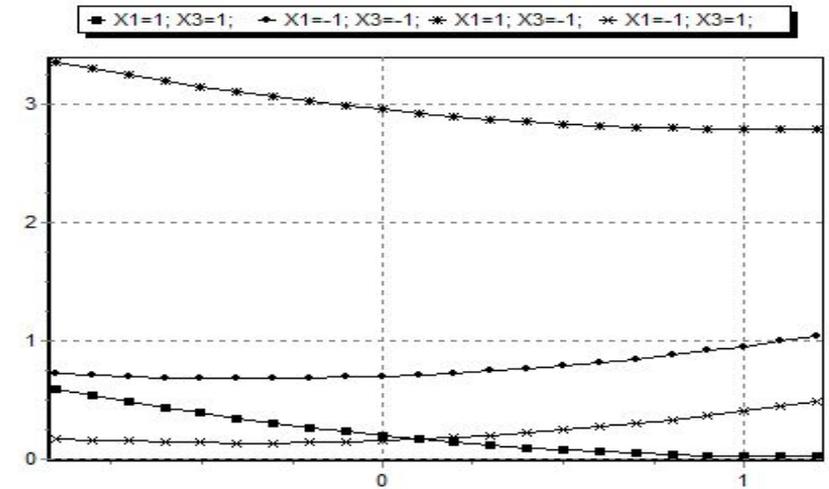
$$Y = 1,231 + 0,552X_1 - 0,075X_2 - 0,824X_3 - 0,586X_1^2 + 0,144X_2^2 + 0,352X_3^2 - 0,210 X_1X_2 - 0,552X_1X_3. \quad (13)$$

$$B_{ii} = -35,72 + 0,21 \rho - 13,34 \tau + 10,26D - 0,0002 \rho^2 + 57,6 \tau^2 + 7,98D^2 - 0,084 \rho \tau - 0,05\rho D \quad (14)$$

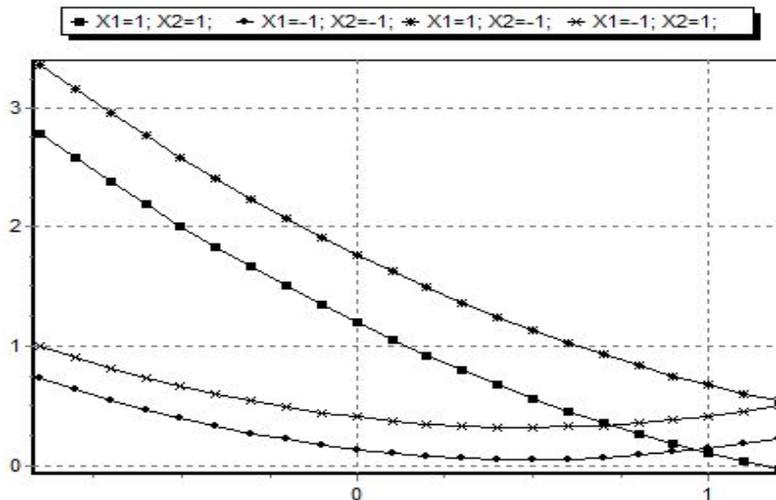
# Зависимость прочности композита на КФС



Зависимость прочности композита при статическом изгибе, МПа от плотности плит ( $X_1$ )



Зависимость прочности композита при статическом изгибе, МПа от удельной продолжительности прессования ( $X_2$ )



Зависимость прочности композита при статическом изгибе, МПа от доли опилок ( $X_3$ )

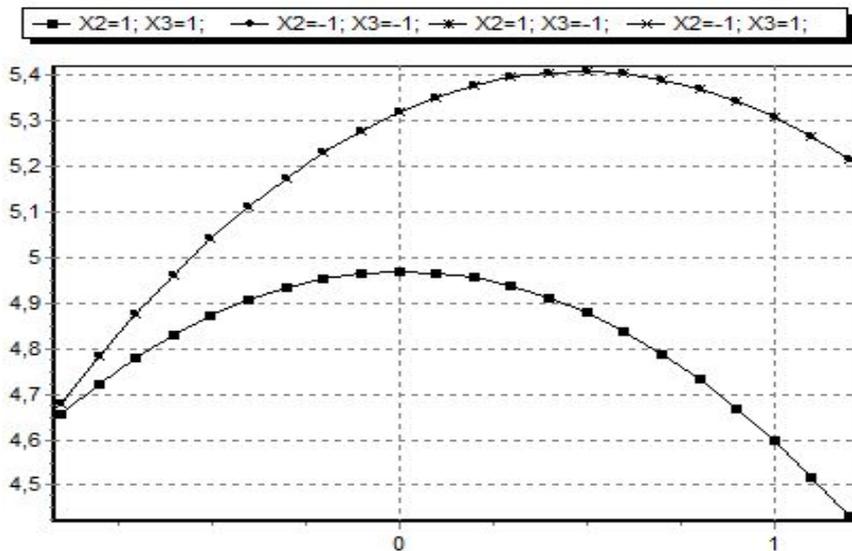


# Определение коэффициента теплопроводности



№ образца	Масса образца, г	Толщина образца, мм	Ширина образца, мм	Длина образца, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/м·К
1	58,7	18,8	10	10	0,312	0,083
2	58,5	18,8	10	10	0,311	0,085
3	55,6	19,3	10	10	0,288	0,082
4	53,05	19,8	10	10	0,268	0,081
5	59,15	19,6	10	10	0,301	0,079
6	66,2	19,6	10	10	0,338	0,086
7	121,68	23,6	9,95	9,95	0,516	0,111

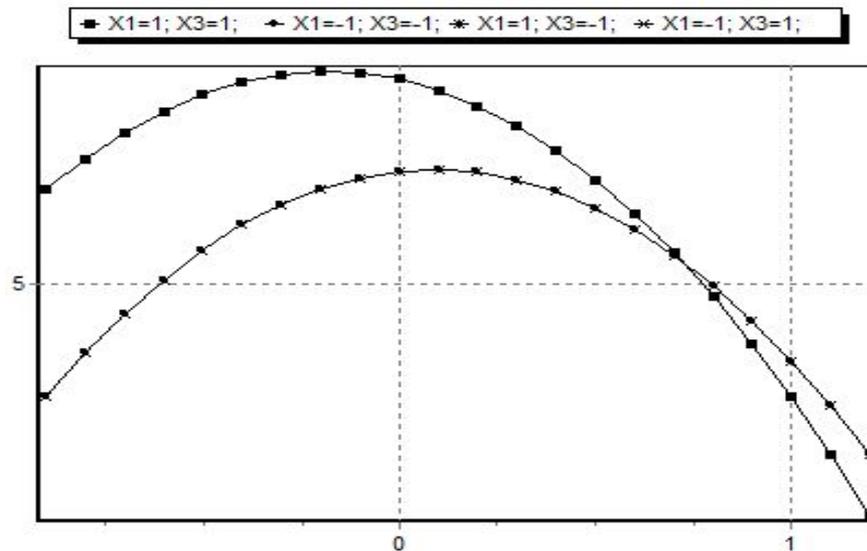
# Исследование разбухания композита по толщине



Зависимость разбухания по толщине от плотности ( $X_1$ )

$$Y = 5,815 + 0,112 X_1 - 0,193 X_2 - 0,380 X_1^2 - 0,655 X_2^2 - 0,180 X_1 X_2 \quad (15)$$

$$P_h = -0,000152 p^2 - 65,5 t^2 + 0,12664 p + 76,17 t - 0,036 p t - 35,299 \quad (16)$$



Зависимость разбухания по толщине от удельной продолжительности прессования ( $X_2$ )

# Исследование свойств композита на комбинированном наполнителе

## Состав

Обозначение состава композита	5/95 ПЛИТ			40/60		
	Фракция стружки	10/2	10/7	7/2	10/2	10/7
Доля стружки разного фракционного состава, %	10	90		30	70	
		5	95		40	60
Масса стружки, г	28	12,6	239,4	84	78,4	117,6

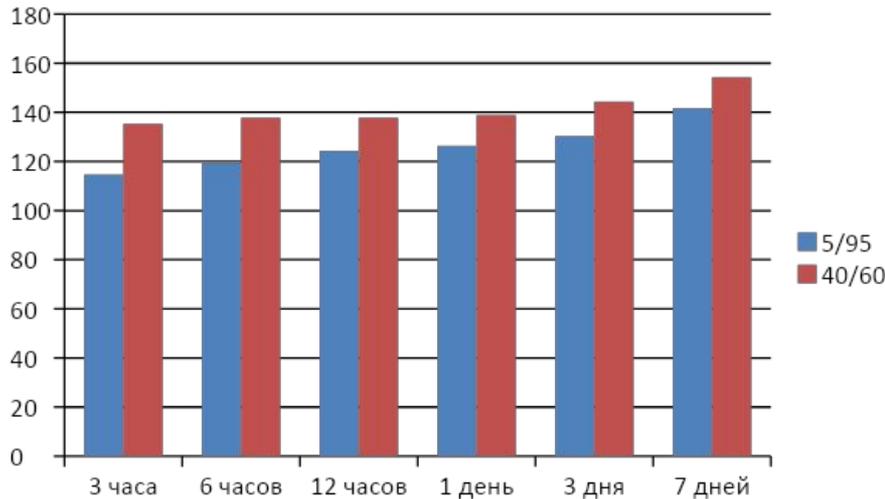
## Результаты определения физико-механических показателей композита

Номер образца	5/95 I	5/95 II	5/95 III	40/60 IV	40/60 V	40/60 VI
Предел прочности при статическом изгибе $\sigma_{и}$ , МПа	0,52	0,60	0,57	1,33	0,75	0,97
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	276	258	271	312	289	323

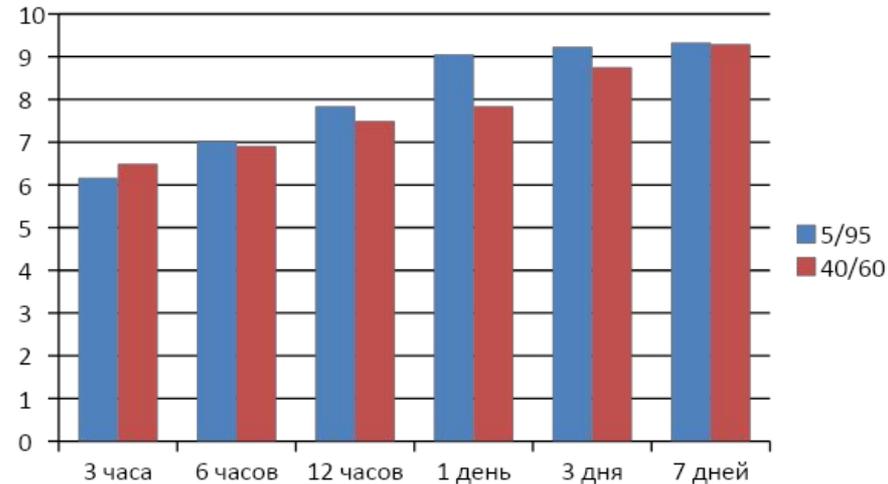
# Определение коэффициента теплопроводности композита на



Номер образца	Плотность, $\text{г/см}^3$	Теплопроводность $\lambda$ , $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$		
<b>Композит 5/95</b>				
Среднее значение	15,52	61,11	0,394	0,094
<b>Композит 40/60</b>				
Среднее значение	15,40	60,61	0,394	0,097



**Водопоглощение**



**Разбухание**

# Разработка состава и исследование СВОЙСТВ

## КОМПОЗИТА НА МИНЕРАЛЬНОМ ВЯЖУЩЕМ

Наименование фактора	Обозначения уровней		Уровни варьирования			Интервал варьирования $\Delta_i$
	Натуральные	Кодированные	-1	0	+1	
Доля магнезита %	М	$X_1$	60	70	80	10
Доля мелкой фракции в древесных отходах %	Оп	$X_2$	20	35	50	15
Концентрация раствора бишофита %	Б	$X_3$	5	10	15	5

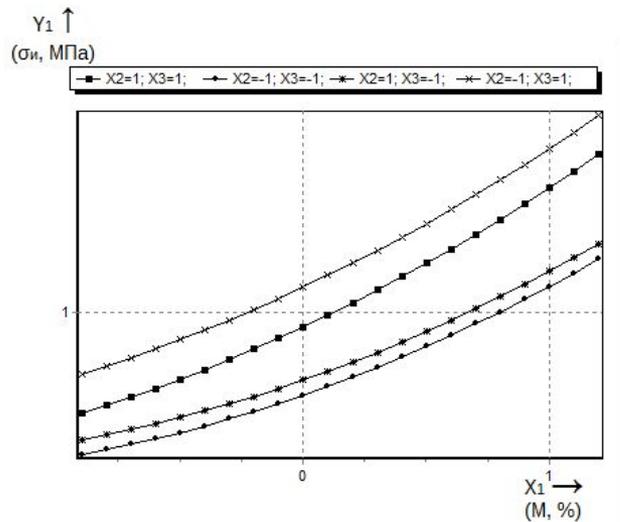
$$Y_1 = 0,611 + 0,519X_1 - 0,03X_2 + 0,205X_3 + 0,11X_1^2 + 0,269X_2^2 - 0,067X_2X_3 + 0,074X_1X_3; \quad (17)$$

$$\sigma_{\text{и}} = 4,216 - 0,117 \cdot M - 0,0768 \cdot \text{Оп} - 0,0313 \cdot B + 0,001 \cdot M^2 + 0,0012 \cdot \text{Оп}^2 - 0,00089 \cdot \text{Оп} \cdot B + 0,00148 \cdot M \cdot B; \quad (18)$$

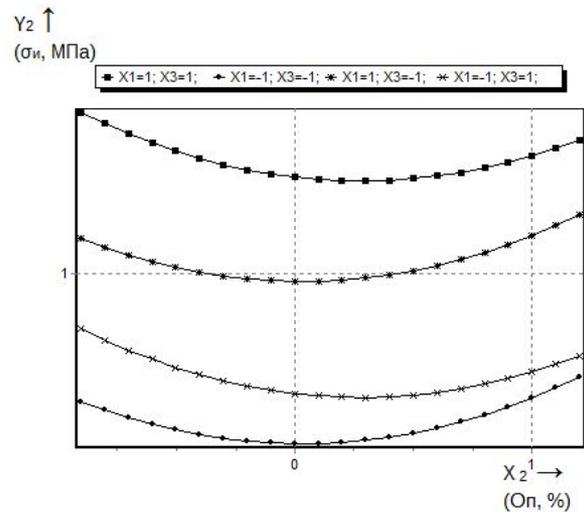
$$Y_2 = 1,221 + 1,075X_1 - 0,095X_2 + 0,231X_3 + 0,495X_1^2 - 0,219X_1X_2 + 0,306X_1X_3; \quad (19)$$

$$\sigma_{\text{сж}} = 18,419 - 0,5956 \cdot M + 0,0959 \cdot \text{Оп} - 0,3822 \cdot B + 0,00495 \cdot M^2 - 0,00146 \cdot M \cdot \text{Оп} + 0,00612 \cdot M \cdot B; \quad (20)$$

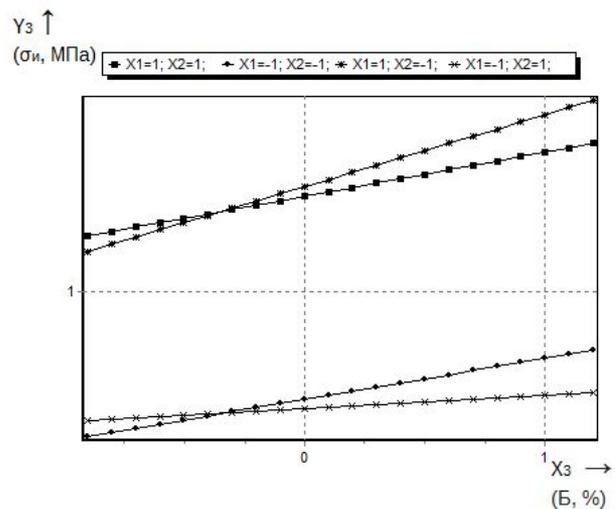
# Зависимости прочности при изгибе



а – от доли магнезита;



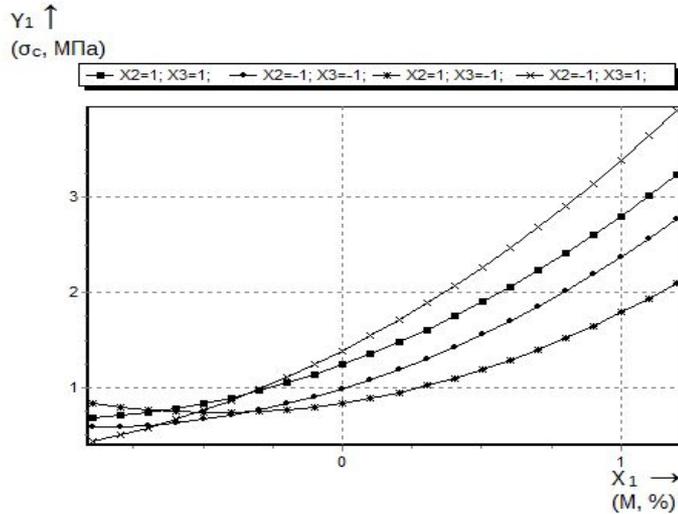
б - от доли мелкой фракции



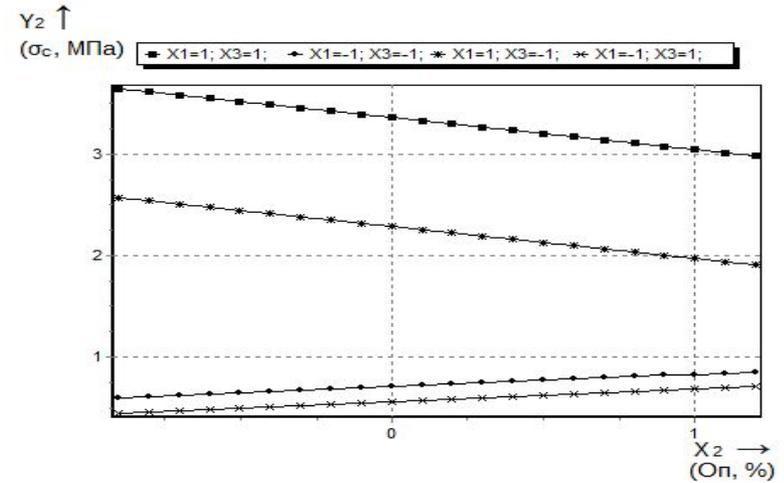
в- от концентрации раствора бишофита



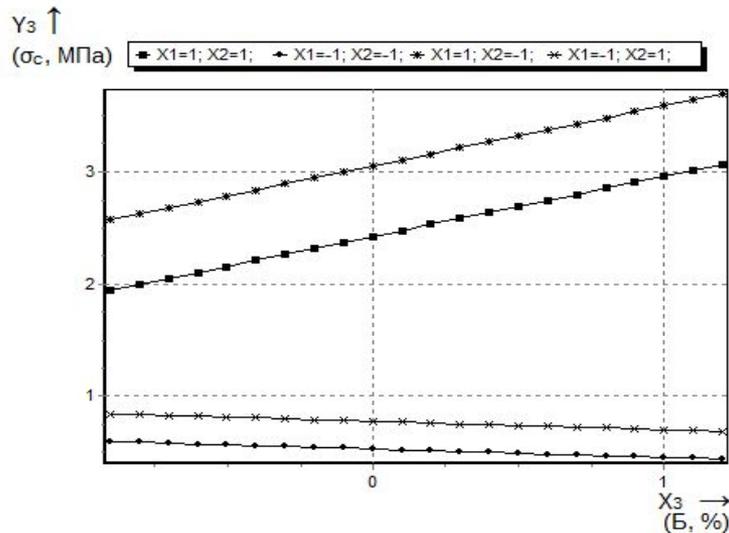
# Зависимости прочности при сжатии



а – от доли магнезита;



б - от доли мелкой фракции



в- от концентрации раствора бишофита

Коэффициент теплопроводности  
композиата на минеральном вяжущем

Физическая величина	Среднее значение
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,510
Коэффициент $\lambda$ , Вт/м·К	0,114

# Оценка сходимости расчетных и экспериментальных значений коэффициента теплопроводности

Вид композита, плотность (кг/м <sup>3</sup> )	Значение коэффициента теплопроводности, Вт/(м·К)				Отклонение экспериментальных данных от теоретических			
	экспериментально е	теоретическое			абсолютное, Вт/(м·К)		относительное, %	
		формула (2.8)	формула (2.15)	формула (2.16)	min	max	min	max
Стружка + КФН, 300	0,087	0,107	0,114	0,107	-0,02	-0,027	-18,69	-23,68
Стружка + ФФС, 300	0,089	0,108	0,111	0,099	-0,01	-0,022	-10,10	-19,82
Стружка 5/95 + ФФС, 400	0,094	0,134	0,141	0,121	-0,027	-0,047	-22,31	-33,33
Стружка 40/60 + ФФС, 400	0,097	0,140	0,144	0,124	-0,027	-0,047	-22,77	-30,71
Стружка + магнезит, 510	0,114	0,114	0,104	0,109	0	0,01	0	9,62

# Схема технологического процесса



# Расчет экономической целесообразности

## Расчет потребности и стоимости сырья и материалов

Наименование	Ед. изм.	Потребность		Стоимость	
		на единицу	на программу	единицы, руб.	сумма, т.р.
<b>1. Сырье:</b>					
Стружка	м <sup>3</sup>	1,27	26556	0	0
<b>Итого:</b>					<b>0</b>
<b>2. Материалы</b>					
Смола ФФС	т	0,125	2613	48000	124944
<b>Всего:</b>					<b>124944</b>

## Сравнительный анализ материалов

Вид утеплителя	Коэффициент теплопроводности	Расход на 1 м <sup>2</sup> , м <sup>3</sup>	Стоимость материала, руб.
Композит Теплоизоляционный в составе панели с наружными слоями из плит OSB	0,089	0,15	2142
SIP-панели	0,045	0,174	2276

# Выводы и

## рекомендации

1. Получен композиционный материал для композиционного назначения с использованием древесных отходов, включая стружку от деревообрабатывающих станков, установлены взаимосвязи между компонентным составом и эксплуатационными свойствами, параметрами режимов обработки.
2. В соответствии с физической картиной процесса разработаны структурные и математические модели теплопроводности, основанные на фундаментальных законах тепло-массопереноса в материалах с неоднородной структурой, а также представлениях об анизотропии древесных частиц.
3. Получены основные статистические оценки распределения геометрических параметров стружки, позволяющие в дальнейшем моделировать структуру и процесс теплопередачи в композитах с учетом размерно-качественных параметров наполнителя.
4. Доказана возможность применения на этапе проектирования составов новых композиционных материалов теоретических положений обобщенной теории проводимости, используемой для расчета двух- и трехкомпонентных смесей, т. е. дисперсных систем, применительно к расчету коэффициента теплопроводности композитов на основе измельченной древесины и матрицы в виде синтетических смол или минеральных вяжущих.

# Выводы и

## рекомендации

5. Для трех видов композиционных материалов, отличающихся по составу наполнителя и виду матрицы, разработаны математические модели влияния доли мелкой фракции в составе измельченной древесины на прочностные свойства композита и его теплопроводность. Полученные математические модели в виде уравнений регрессии показывают, что меньшее влияние на прочность композита на основе синтетических смол оказывает удельная продолжительность прессования, чем плотность. При изменении плотности на  $50 \text{ кг/м}^3$  прочность теплоизоляционного композита меняется на  $0,55 \text{ МПа}$ , при изменении удельной продолжительности прессования на  $0,05 \text{ мин/мм}$  прочность композита меняется на  $0,07 \text{ МПа}$ , при изменении доли опилок на  $0,2$  прочность меняется на  $0,82 \text{ МПа}$ . При уменьшении доли добавки опилок разбухание по толщине уменьшается: при плотности композита без добавки опилочной фракции  $300 \text{ кг/м}^3$  и удельной продолжительности прессования  $0,4 \text{ мин/мм}$  средняя величина разбухания по толщине составила  $6,96 \text{ МПа}$ , что положительно характеризует новый материал.

6. Определены фактические значения коэффициента теплопроводности для трех видов композиционных материалов, при этом наилучшие теплоизоляционные свойства имеют композиционные материалы плотностью  $300 \text{ кг/м}^3$  на карбамидоформальдегидном связующем ( $\lambda=0,087 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) и фенолформальдегидном связующем ( $\lambda=0,089 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), прочность при изгибе которых удовлетворяет требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам.

# Выводы и

## рекомендации

7. При использовании комбинированного наполнителя из стружки-отходов от четырехсторонних строгальных станков с добавкой стружки от центробежных стружечных станков в количествах от 5 до 40 % повышается плотность, прочность и теплопроводность образцов. Прочность композиционного материала увеличивается в среднем на 0,13 МПа на каждые 10 % увеличения доли добавки стружки от центробежных станков. При этом теплоизоляционный композит на комбинированном наполнителе довольно активно впитывает воду, в связи с чем рекомендуется использовать добавку стружки от центробежных стружечных станков к стружке-отходам не более 30 %.

8. Для получения конструкционно-теплоизоляционного материала рекомендуется состав композита на основе минерального вяжущего и стружки-отходов, содержащих не более 50 % частиц опилочной фракции: доля древесного наполнителя по массе - 35 %, доля магнезита каустического – 65 %; концентрация раствора бишофита – 15 %. Полученный композит имеет коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,114 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , прочность при изгибе не ниже 0,5 МПа.

9. С годовым объемом переработки стружки-отходов от 20 до 27 тыс. м<sup>3</sup> целесообразно производить теплоизоляционные плитные материалы на синтетическом связующем. Стоимость ограждающих конструкций на основе разработанного композита при этом сопоставима со стоимостью SIP-панелей. При меньших объемах стружки-отходов рекомендуется производить конструкционно-теплоизоляционный композит по технологии получения

**СПАСИБО  
ЗА  
ВНИМАНИЕ!**