

**А. В. Артёмов, А. Е. Шкуро, Т. В. Якубова,  
В. Г. Буриндин**

## **ЭМИССИЯ СВОБОДНОГО ФОРМАЛЬДЕГИДА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ПЛАСТИКОВ БЕЗ СВЯЗУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ**

*Ключевые слова: композит, получение, опилки сосны, природный лигнин, формальдегид, уротропин, карбамид, полимеризация, оптимизация, эмиссия формальдегида, свойства.*

*Существующие методы получения лигноцеллюлозных пластиков без синтетических связующих (ПБС основаны на пьезотермической обработке растительного сырья. Несмотря на разнообразие подходов, механизм формирования композита остаётся недостаточно изученным ввиду сложности состава сырья и многообразия сопутствующих химических процессов. Известно, что ключевую роль в образовании полимерной матрицы играет природный лигнин, взаимодействующий с формальдегидом, выделяющимся из растительного сырья при нагревании. Таким образом, эмиссия свободного формальдегида из готового материала может служить косвенным индикатором глубины протекания реакций полимеризации и сшивания лигнина. Целью данной работы было исследование механизмов взаимодействия формальдегида с лигнином, а также влияния на эти процессы специальных реагентов – карбамида и уротропина. Предметом изучения стали химические и физико-механические изменения в ПБС при варьировании влажности сырья, температуры прессования и концентрации добавок. Получение образцов ПБС осуществлялось методом горячего прессования композиций на основе сосновых опилок в закрытых пресс-формах. Анализировались три основных характеристики полученных материалов: изменение массы, модуль упругости при изгибе (по прогибу образца диска) и уровень эмиссии формальдегида. Использовался метод математического планирования экспериментов, позволяющий определить оптимальное сочетание факторов и предсказывать зависимость свойств от вводимых добавок и технологических параметров. Результаты исследования продемонстрировали, что формальдегид активно участвует в процессе формирования ПБС, а его эмиссия, зависящая от условий получения, указывает на степень протекающих химических взаимодействий с природным лигнином.*

**A. V. Artyomov, A. E. Shkuro, T. V. Yakubova,  
V. G. Buryndin**

## **FREE FORMALDEHYDE EMISSIONS AS AN INDICATOR OF STRUCTURE FORMATION OF LIGNOCELLULOSE PLASTICS WITHOUT SYNTHETIC RESINS**

*Key words: composite, manufacturing, pine sawdust, natural lignin, formaldehyde, hexamethylenetetramine, urea, polymerization, optimization, formaldehyde emission, properties.*

*The existing methods for producing lignocellulose plastics without synthetic resins (PWR) are based on piezothermic processing of plant raw materials. Despite the variety of approaches, the mechanism of composite formation remains poorly understood due to the complexity of the raw material composition and the variety of accompanying chemical processes. It is known that natural lignin, which interacts with formaldehyde released from vegetable raw materials when heated, plays a key role in the formation of the polymer matrix. Thus, the emission of free formaldehyde from the finished material can serve as an indirect indicator of the depth of the polymerization and crosslinking reactions of lignin. The purpose of this work was to study the mechanisms of interaction of formaldehyde with lignin, as well as the effect of special reagents on these processes – carbamide and urotropin. The subject of the study was chemical and physico-mechanical changes in PWR with varying humidity of raw materials, pressing temperature and concentration of additives. The production of PWR samples was carried out by hot pressing compositions based on pine sawdust in closed molds. Three main characteristics of the obtained materials were analyzed: the change in mass, the modulus of elasticity under bending (according to the deflection of the disk sample) and the level of formaldehyde emission. The method of mathematical planning of experiments was used to determine the optimal combination of factors and predict the dependence of properties on the introduced additives and technological parameters. The results of the study demonstrated that formaldehyde is actively involved in the formation of PWR, and its emission, depending on the conditions of production, indicates the degree of ongoing chemical interactions with natural lignin.*

### **Введение**

Известно, что в естественных условиях натуральная древесина выделяет некоторое количество свободного формальдегида, причем этот показатель варьируется в зависимости от конкретной породы дерева. Так, свежесрубленный дуб при температуре около 40 °С способен выделять примерно 0,5 мг формальдегида на кубический метр воздуха. Механизмы данного процесса пока недостаточно изучены и существуют различные теории относительно природы этого явления [1-4].

Некоторые ученые полагают [5], что лигнин древесины служит источником формальдегида вследствие реакции Фентона, катализируемой самим лигнином (LMF). Вместе с тем, другие специалисты подчеркивают [6], что именно древесина сама становится причиной выделения формальдегида, поскольку он появляется в ходе естественных биохимических процессов её распада и жизнедеятельности микроорганизмов.

Процесс сушки (нагрева) древесины интенсифицирует процесс выделения формальдегида из нее,

концентрация которого зависит от породы, температуры среды и текущей влажности древесины. При этом действие температуры оказывает более значительное воздействие на концентрацию выделяемого формальдегида из древесины [7, 8].

В настоящее время исследуются разные технологии пьезотермообработки лигноцеллюлозосодержащего сырья (древесные опилки, растительные волокна и проч.) с целью получения композиционных пластиков без применения связующих (ПБС) [9, 10]. Все способы формирования ПБС условно можно подразделить на два основных метода основанных на технологиях «Masonite» и «Lignoplast». Хотя различные технологии и отличаются друг от друга, но общие научные основы и подходы остаются неизменными: при воздействии высоких температур и давления из лигноцеллюлозосодержащего сырья образуется композитный материал [11, 12].

Сегодня отсутствует общепринятая концепция механизма структурообразования ПБС, так как пьезотермический процесс лигноцеллюлозосодержащего сырья химически сложен, исходные растительные компоненты имеют различную химическую структуру, а свойства конечного продукта зависят от множества факторов: вида сырья, условий обработки и технологического режима [13].

Механизм процесса образования ПБС по технологии «Lignoplast», был предложен на основании выполненных исследований по трансформации растительного сырья (на примере древесного) при его пьезотермической обработке с использованием метода ДСК. Было установлено, что как в открытом, так и в герметизированном пространстве под действием кислой среды, образующейся выделяемыми простейшими органическими кислотами, происходит двухэтапное преобразование лигнинцеллюлозосодержащих компонентов растительного (древесного) сырья. На первом этапе происходит деструкция этих компонентов до простейших органических соединений в результате гидротермического гидролиза. На втором этапе происходит поликонденсация и полимеризация этих «осколков» в сшитый полимер [12].

Для такой технологии структурообразования ПБС ряд авторов [14, 15] важную роль отводят растительному лигнину, который при подходящих условиях давления и температуры может выступать в качестве натурального связующего вещества.

Механизм термического распада лигнина изучен слабо из-за его сложной химической структуры и разнообразия связей. Разрушение начинается с разрывов слабых связей при низкой температуре, а при повышении – происходят реакции разрушения более сильных связей другим путем. Конденсация лигнина усиливается с повышением температуры, при которой свободные положения бензольных колец и спиртовые группы активно участвуют в реакциях поликонденсации. После первичной конденсации устойчивость лигнина повышается, особенно у хвойных пород. Расщепление эфирных связей начинается при ~170°C и наиболее активно при 280-300°C [16, 17].

Отмечается [18], что при повышенной температуре в кислой или щелочной среде может протекать процесс декарбонирования, в результате которого

от фенолпропановой единицы лигнина отщепляются формальдегид или другие карбоксильные группы.

Согласно работам [19-21], считается, что при взаимодействии формальдегида с лигнином происходит его метилолирование. В зависимости от среды (кислотная и щелочная) метилольная группа может присоединяться к атомам 2, 5 и 6 положения ароматического кольца или к атому углерода в альфа-положении боковой пропановой цепочки.

Согласно [12] представленным схемам поликонденсации простых фрагментов с многофункциональными компонентами древесины, формальдегид количественно взаимодействует с лигнином с образованием сшитой структуры по аналогии с фенолформальдегидной смолой.

Таким образом, можно говорить, о высокой роли взаимодействия природного лигнина исходного растительного сырья с выделяющимся формальдегидом из него в результате пьезотермической обработки в замкнутом пространстве в условиях кислой среды в формировании структуры ПБС. Выделение свободного (несвязанного) формальдегида из ПБС служит косвенным подтверждением его участия в процессе структурообразования данного материала.

В качестве дополнительного доказательства, подтверждающего роль формальдегида в формировании структуры ПБС, было проведено исследование влияние химических добавок таких как мочевины (карбамид) и уротропин (гексаметилентетрамин) [22].

Карбамид в изучаемых условиях способен реагировать с свободным формальдегидом: при нагревании он разлагается с образованием ионов аммония, которые, взаимодействуя с формальдегидом, приводят к образованию гексаметилентетрамина.

Уротропин напротив, при повышении температуры разлагается на аммиак и формальдегид, что делает его источником дополнительного свободного формальдегида (рис.1). Этот формальдегид может количественно взаимодействовать с лигнином (осуществлять его метилолирование) (рис.2), тем самым способствовать повышению его реакционной способности, создавая условия для взаимодействия с другими компонентами реакционной смеси (рис.3).

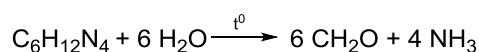


Рис. 1 – Схема разложения уротропина

Fig. 1 – Urotropin decomposition scheme

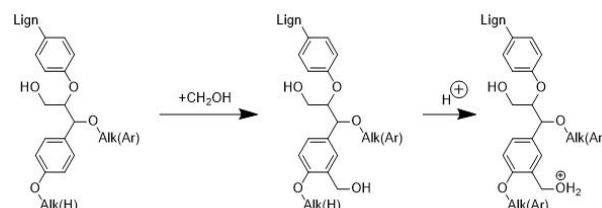


Рис. 2 – Схема метилирования лигнина формальдегидом в кислой среде

Fig. 2 – Scheme of lignin methylation with formaldehyde in an acidic environment

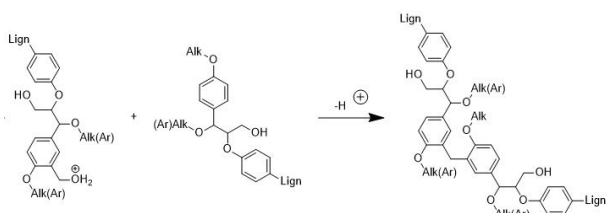


Рис. 3 – Схема возможной конденсации лигнина в кислой среде

Fig. 3 – Scheme of possible lignin condensation in an acidic environment

Целью данной работы являлась оптимизация процесса получения лигноцеллюлозных пластиков без связующих путём изучения роли формальдегида в структурообразовании и влияния технологических параметров и химических добавок на свойства материала.

### Экспериментальная часть

Для изучения закономерностей участия свободного формальдегида в процессе получения ПБС при пьезотермической обработке в закрытом пространстве, выделяемого из исходного растительного сырья, был применен метод математического планирования эксперимента [23].

Для получения ПБС в качестве исходного сырья использовались древесные отходы деревообработки в виде сосновых опилок с фракционным составом 0,7 мм и менее. Получение образцов ПБС осуществлялось в закрытой пресс-форме путем горячего компрессионного прессования при следующих условиях: давление прессования – 40 МПа, температура прессования – 180 °С, продолжительность прессования – 10 мин, продолжительность охлаждения под давлением – 10 мин. Полученные образцы кондиционировались в комнатных условиях в течение суток.

В качестве входных факторов эксперимента были выбраны: содержание уротропина ( $Z_1$ , %), карбамида ( $Z_2$ , %), а также исходная влажность пресс-композиции ( $Z_3$ , %) и температура прессования ( $Z_4$ , °С). За выходные параметры взяты: убыль массы пресс-композиции при горячем прессовании  $\Delta G$  [24], модуль упругости Еизг (по прогибу горячего образца-диска) [25], выделение свободного формальдегида по методу WKI [26].

В табл. 1 представлены матрица планирования факторного эксперимента вида  $2^{4-1}$  в кодированных и натуральных значениях, а также значения свойств ПБС.

1. *Выделение формальдегида.* Образцы ПБС, полученные без добавок уротропина и карбамида, демонстрируют фоновое выделение формальдегида на уровне 7,9 мг/100 г. Это значение согласуется с данными об естественной эмиссии формальдегида из ПБС, обусловленной его реакцией с лигнином при формировании сшитого полимера [12]. При этом установлена обратная зависимость: снижение содержания лигнина в сырье уменьшает его потребность в формальдегиде для сшивания, что приводит к увеличению доли несвязанного (свободного) формальдегида в готовом материале.

Таблица 1 – Матрица планирования и результаты эксперимента по исследованию совместного влияния карбамида и уротропина на свойства ПБС

Table 1 – Planning matrix and results of an experiment on the combined effect of urea and urotropine on the properties of PWR

№	Натуральные значения факторов				Кодированные значения факторов				Результаты испытаний		
	$Z_1$ , %	$Z_2$ , %	$Z_3$ , %	$Z_4$ , °С	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y(E_{изг})$ , МПа	$Y(\Delta G)$ , %	$Y(WKI)$ , мг/100 г
1	2	6	10	160	-1	-1	-1	-1	1950	7,3	14,4
2	4	6	10	180	1	-1	-1	1	1720	10,1	3,4
3	2	10	10	180	-1	1	-1	1	1580	10,3	3,2
4	4	10	10	160	1	1	-1	-1	2570	8,5	15,2
5	2	6	20	180	-1	-1	1	1	1450	16,7	5,1
6	4	6	20	160	1	-1	1	-1	1270	15,2	7,3
7	2	10	20	180	-1	1	1	-1	1200	12,4	2,1
8	4	10	20	160	1	1	1	1	1680	14,4	0,8
9	3	8	15	170	0	0	0	0	1990	12,0	3,2
10	0	0	15	170	0	0	0	0	1460	11,6	7,9

2. *Влияние содержания уротропина.* Повышение концентрации уротропина оказывает двойственное влияние на свойства ПБС, выявляя баланс между прочностью и структурной стабильностью. С одной стороны, увеличение содержания уротропина с уровня опыта №1 до уровня опыта №2 приводит к снижению модуля упругости при изгибе примерно на 12 % (с 1950 до 1720 МПа). С другой стороны, оно же способствует значительному улучшению структурной стабильности: потеря массы снижается с 10,1% до 7,3%, а эмиссия формальдегида – с 14,4 до 3,4 мг/100 г. Это позволяет предположить, что уротропин, будучи источником формальдегида, усиливает процессы сшивания. Однако возможное избыточное сшивание или изменение морфологии полимерной сетки могут оказать отрицательное влияние на её способности к упругой деформации, что приводит к снижению модуля упругости.

3. *Влияние содержания карбамида.* Содержание карбамида в пресс-композиции существенно способствует повышению модуля упругости образцов (особенно при оптимальных температурах обработки). Влияние карбамида на свойства ПБС носит нелинейный характер и значительно зависит от температурного режима прессования. Введение карбамида приводит к увеличению модуля упругости, тем не менее существует оптимальный диапазон концентраций, превышение которого приводит к ухудшению свойств материала.

В одинаковых условиях увеличение доли содержания карбамида (сравнивая опыты №1 и №3) приводит к незначительному снижению модуля упругости примерно на 8 % и увеличению потери массы до 10,3 %. В то же время, уровень эмиссии формальдегида значительно снижается – с 14,4 до 3,2 мг/100 г. Это снижение может указывать на отсутствие завершения процесса или его ингибирование: карбамид, связывая

формальдегид, замедляет или необратимо останавливает реакцию сшивания лигнина, что препятствует образованию полноценной полимерной сетки.

Противоположный эффект наблюдается при одновременном изменении двух факторов: увеличение доли карбамида на фоне снижения температуры прессования (образец №4) приводит к максимальному модулю упругости в 2570 МПа, однако это сопровождается неприемлемо высокой эмиссией формальдегида (15,2 мг/100 г) и потерей массы. Это указывает на принципиально иной механизм: пониженная температура, вероятно, недостаточна для эффективного связывания всего объема формальдегида, высвобождающегося при разложении избыточного карбамида, что приводит к его накоплению в свободной форме.

4. *Влажность исходного сырья.* Присутствие воды в исходном прессе обладает двойственной природой: с одной стороны, она служит средой для проведения различных химических процессов, а с другой – выступает в роли химического компонента. Соотношение воды в пресс-композиции определяет как кинетику химических реакций, так и степень их завершенности, полноту протекания процессов структурообразования.

Из табл.1 видно, что повышение влажности отрицательно сказывается на всех показателях: снижается модуль упругости, увеличиваются потери массы и выделение свободного формальдегида. Все однозначно свидетельствует о незавершенности химических преобразований. Сравнение образцов №1 и №5, имеющих одинаковое содержание уротропина и карбамида, но различающихся по уровню влажности (20% у образца №5), наглядно иллюстрирует эффект повышения влажности, приведший к значительному снижению модуля упругости на 26%.

Данный эффект обусловлен взаимодействием химических и физических факторов. С химической точки зрения, избыток воды может участвовать в конкурентных реакциях, приводя к гидролизу образующихся связей и затрудняя конденсацию формальдегида с лигнином, что нарушает формирование прочной трехмерной структуры. С физической стороны, избыточная влага при нагреве активно испаряется, создавая паровое давление, которое мешает эффективному уплотнению материала, вызывает локальные структурные повреждения (вздутия) и ухудшает теплопередачу, что делает процесс отверждения неравномерным [27].

5. *Температура прессования.* Температура прессования является определяющим фактором, задающим баланс между полнотой химических превращений и термической стабильностью компонентов. При недостаточной температуре реакции с участием лигнина не достигают необходимой глубины, в то время как её превышение вызывает термическую деструкцию лигноуглеводного комплекса и разложение модифицирующих добавок.

Экспериментально установленный оптимум составляет около 170 °С. В этих условиях (опыт №9) достигается максимальная эффективность структурообразования: отмечается высокий модуль упругости при изгибе на фоне минимальных потерь массы и

низкой эмиссии формальдегида. Данное сочетание свойств свидетельствует о том, что выбранный температурный режим обеспечивает необходимую энергию активации для полного протекания реакций сшивания без инициирования побочных процессов деструкции.

В результате анализа были получены следующие уравнения регрессий для параметров оптимизации:

$$Y(\Delta G) = -12,5 + 0,2 \cdot Z_1 - 0,2 \cdot Z_2 + 0,6 \cdot Z_3 + 0,1 \cdot Z_4 \\ (R^2=1,00);$$

$$Y(E_{изг}) = 3,09 + 0,13 \cdot Z_1 + 0,04 \cdot Z_2 - 0,06 \cdot Z_3 - 0,01 \cdot Z_4 \\ (R^2=0,80);$$

$$Y(WKI) = 73,2 + 0,2 \cdot Z_1 - 0,6 \cdot Z_2 - 0,5 \cdot Z_3 - 0,3 \cdot Z_4 \\ (R^2=0,90).$$

Высокая достоверность полученных регрессионных моделей ( $R^2 > 0,80$ ) подтверждает адекватность линейного математического аппарата для описания исследуемых процессов. На основании уравнений регрессии, связывающих варьируемые факторы (содержание уротропина, карбамида, влажность, температуру) с критериями оптимизации, были построены графические поверхности отклика (рис. 4, 5). Эти поверхности наглядно демонстрируют влияние каждого фактора и их взаимодействий на целевую функцию.

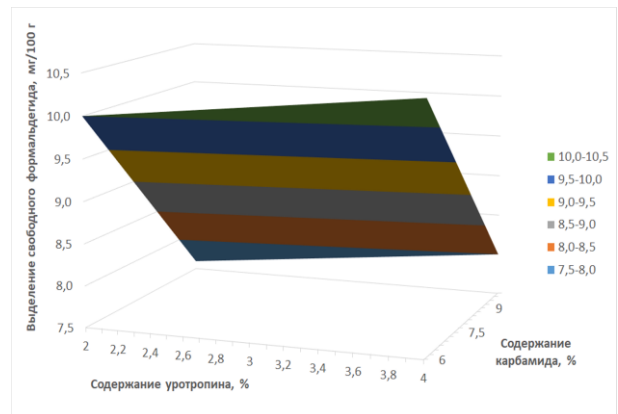


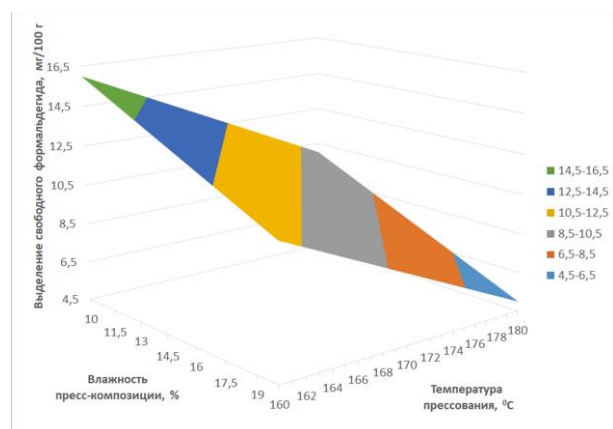
Рис. 4 – Зависимость выделения формальдегида из ПБС от содержания уротропина и карбамида в исходном пресс-композиции

Fig. 4 – Dependence of formaldehyde release from PWR on the content of urotropine and carbamide in the initial press composition

Введение уротропина в пресс-композицию приводит к незначительному увеличению выделения формальдегида на 4 %, тогда как добавка карбамида значительно снижает его выделение на 20,8 %. Это можно объяснить тем, что аммиак, образующийся при разложении карбамида, активно взаимодействует с формальдегидом.

На уровень выделения формальдегида из ПБС значительно влияют температура прессования и влажность пресс-материала. Повышение влажности пресс-материала с 10 до 20 % приводит к снижению выделения формальдегида с 13,0 до 8,0 мг/100 г материала, что составляет сокращение в 1,7 раза. Также, увеличение температуры прессования с 160 до 180 °С

приводит к уменьшению эмиссии формальдегида с 13,5 до 7,5 мг/100 г, что соответствует снижению в 1,8 раза.



**Рис. 5 – Зависимость выделения формальдегида из ПБС от влажности пресс-композиции и температуры прессования**

**Fig. 5 – Dependence of formaldehyde release from PWR on the moisture content of the press composition and the pressing temperature**

Параметрами оптимизации являлась выделение свободного формальдегида из образцов ПБС. Результаты решения линейных уравнений методом линейного программирования показывает, что оптимальные значения определяющих факторов находятся в пределах значений нулевого опыта:

- содержание уротропина, % 3;
- содержание карбамида, % 8;
- влажность пресс-сырья, % 15;
- температура прессования, °C 170.

Таким образом, оптимальный комплекс свойств ПБС – максимальная прочность при минимальной эмиссии формальдегида – достигается при использовании пресс-композиции со сбалансированным содержанием уротропина и карбамида в условиях строго определённых влажности сырья и температуры прессования (~170 °C).

### Заключение

Анализ полученных данных позволяет сформулировать ряд выводов относительно влияния ключевых факторов на формирование качественных характеристик ПБС, учитывая специфику реакций формальдегида с компонентами пресс-композиции.

#### 1. Взаимодействие формальдегида с лигнином.

Взаимодействие формальдегида с лигнином, приводящее к образованию трёхмерной полимерной сетки, является основой формирования однородной структуры ПБС. Из представленных данных следует, что увеличение эмиссии формальдегида положительно коррелирует с повышением модуля упругости в условиях оптимального соотношения компонентов в пресс-композиции и режима прессования. Тем не менее, избыточное повышение плотности связей может вызывать отрицательные эффекты, такие как утрата эластичности и увеличение хрупкости материала.

#### 2. Влияние уротропина и карбамида.

Уротропин и карбамид оказывают противоположные эффекты на количество формальдегида, выделяемого из растительного сырья. При этом оба компонента играют важную роль в формировании структуры и качества, получаемых ПБС.

Уротропин, являясь источником формальдегида, выступает ускорителем реакций сшивания с лигнином. Это способствует формированию более плотной трёхмерной сетки и повышению прочностных характеристик материала. Однако избыточная концентрация может привести к повышенной эмиссии непрореагировавшего формальдегида, увеличивая токсичность продукта.

Карбамид, напротив, замедляет реакцию формальдегида с лигнином, выступая в роли ингибитора. Его присутствие в пресс-композиции снижает концентрацию активного формальдегида, что снижает долю образования трёхмерных сетей и стабилизации структуры материала. Однако снижение формальдегида способствует снижению его эмиссии из готового материала.

Применение этих добавок определяет ключевой компромисс при создании ПБС: выбор между высокой прочностью (уротропин) и минимальной эмиссией формальдегида (карбамид).

Также стоит отметить, что прочностные показатели ПБС, полученные с применением карбамида, имеют относительно высокие значения по сравнению с контрольными (без применения химических добавок). Это свидетельствует о том, что карбамид также способствует формированию более сшитой структуры ПБС, но механизм формирования иной.

#### 3. Влияние условий получения.

Оптимизация режимов получения ПБС, таких как температура прессования и влажность сырья, оказывает значительное воздействие на процесс протекания химического взаимодействия формальдегида и лигнина.

Снижение влажности пресс-композиции ограничивает количество воды, выступающей в основном как пластификатор, что повышает эффективную концентрацию реагентов. Одновременно повышение температуры интенсифицирует кинетику химических процессов. Совместное действие этих факторов создаёт условия для более полного и направленного протекания реакции с образованием плотной трёхмерной полимерной сетки. Результатом такой оптимизации становится не только улучшение механических свойств, но и значительное снижение эмиссии свободного формальдегида из готового изделия, так как большая его часть оказывается прочно связанной в структуре материала.

Таким образом, уровень эмиссии свободного формальдегида ПБС выступает значимым индикатором процессов сшивания и формирования структуры. Это может свидетельствовать как о недостаточной реакции компонентов, так и о завершении химического взаимодействия. Высокая концентрация выделяемого формальдегида из ПБС может указывать на неэффективность процесса структурообразования данного материала. Для успешного контроля этих процессов с использованием уротропина и карбамида

крайне важно придерживаться точной дозировки, которая обеспечит оптимальный баланс между скоростью формирования структуры и конечной стабильностью полимерной матрицы. Оптимальное соотношение, определенное путем решения линейных уравнений методом линейного программирования, следующее: уротропин – 3% и карбамид – 8% при влажности исходного материала – 15 %.

### Литература

1. B. Meyer, C. Bochmc, *Forest Products Journal*, **47** (5), 45-48 (1997).
2. Z. Que, T. Furuno, *Wood Science and Technology*, **41** (3), 267-279 (2007).
3. M.Z.M. Salem, M. Böhm, *BioResources*, **8** (3), 4775-4790 (2013).
4. И. Ф. Кочуров, В. Г. Палкин, *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*, **1**, 190-195 (2024).
5. Y. Fu, Z. Yuan, Q. S. Sheldon, B. Goodell, *Green Chemistry*, **24**, 6631-6638 (2022). <https://doi.org/10.1039/D2GC02632E>.
6. L.H. Carvalho, F.D. Magalhães, J.M. Ferra, *Formaldehyde: Chemistry, Applications and Role In Polymerization*, (2012). <https://www.researchgate.net/publication/236273710>.
7. M. Schafer, E. Roffacl, *Holz als Roh- und Werkstoff*, **58**, 259-264 (2000).
8. Ю. С. Михайлова, *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, **73**, 114-124 (2011).
9. A. Vititnev, S. Kazitsin, *BioResources*, **20**, 3, 5315-5330 (2025). DOI 10.15376/biores.20.3.5315-5330.
10. N. Saadaoui, A. Rouilly, K. Fares, L. Rigal, *Materials and Design*, **50**, 302-308 (2013). DOI: 10.1016/j.matdes.2013.03.011.
11. В. С. Болтовский, *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*, **2**, **247**, 5-12 (2021). DOI 10.52065/2520-2669-2021-247-2-5-12.
12. A.V. Artemov, V.G. Buryndin, P.S. Krivonogov et al., *Polymer Science. Series D*, **16**, 278-284 (2023).
13. D. Zhang, A. Zhang, L. Xue, *Wood Science and Technology*, **49**, 661-679 (2015). <https://doi.org/10.1007/s0022-6-015-0728-6>.
14. C.P. Araújo Jr., C.A.C. Coaquira, A.L.A. Mattos et al., *Waste Biomass Valoriz*, **9**, 2245-2254 (2018).
15. M. Nassar, G. MacKay, *Wood and Fiber Science*, **16**, 441-53 (1984).
16. M. Brebu, C. Vasile, *Cellulose Chemistry and Technology*, **44**, 9, 353-363 (2010).
17. D. Ciolkosz, R. Wallace, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **5**, 317-329 (2011).
18. В. М. Резенков, *Химия древесины*, **3**, 3-23 (1977).
19. И. Я. Клевинская, А. П. Трейманис, А. Я. Алксне и др., *Химия древесины*, **1**, 57–65 (1991).
20. П. В. Колосов, Н. Г. Базарнова, В. И. Маркин, *Высокомолекулярные продукты карбоксиметилирования растительного сырья с сорбционными свойствами*. Барнаул, АГУ, 2014. 134 с.
21. G. P. Sastry, *Holzforschung*, **23**, 1, 15-17 (1969).
22. П. К. Латышева, А.В. Савиновских, А.В. Артёмов и др., *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*, **1**, 219-221 (2016).
23. А. В. Мяслицин, *Методика планирования экспериментов и обработки их результатов при исследовании технологических процессов в деревообрабатывающей промышленности*. Екатеринбург, УГЛТУ, 2023. 76 с.
24. Н. М. Мухин, А.Е. Шкуро, А.В. Артёмов и др. *Определение и оптимизация технологических параметров пресования реактопластов*. Екатеринбург, УГЛТУ, 2024. 70 с.
25. А. Е. Шкуро, А. В. Артемов, Н. С. Штабнов, В. Г. Бурьиндин, *Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века* (Екатеринбург, Россия, 13-15 сентября, 2025). УГЛТУ, Екатеринбург 2025. С. 96-101.
26. А. Е. Шкуро, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих, *Получение и определение свойств древесностружечных плит*. Екатеринбург, УГЛТУ, 2016. 30 с.
27. А. В. Артёмов, А. Е. Шкуро, В. Г. Бурьиндин, В. Е. Цветков, *Клеи. Герметики. Технологии*, **10**, 2-13 (2025). DOI 10.31044/1813-7008-2025-0-10-2-13.

### References

1. B. Meyer, C. Bochmc, *Forest Products Journal*, **47** (5), 45-48 (1997).
2. Z. Que, T. Furuno, *Wood Science and Technology*, **41** (3), 267-279 (2007).
3. M.Z.M. Salem, M. Böhm, *BioResources*, **8** (3), 4775-4790 (2013).
4. I.F. Kochurov, V.G. Palkin, *Modern Construction Technologies: Theory and Practice*, **1**, 190–195 (2024).
5. Y. Fu, Z. Yuan, Q. S. Sheldon, B. Goodell, *Green Chemistry*, **24**, 6631-6638 (2022). <https://doi.org/10.1039/D2GC02632E>.
6. L.H. Carvalho, F.D. Magalhães, J.M. Ferra, *Formaldehyde: Chemistry, Applications and Role In Polymerization*, (2012). <https://www.researchgate.net/publication/236273710>.
7. M. Schafer, E. Roffacl, *Holz als Roh- und Werkstoff*, **58**, 259-264 (2000).
8. Yu.S. Mikhaylova, *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, **73**, 114-124 (2011).
9. A. Vititnev, S. Kazitsin, *BioResources*, **20**, 3, 5315-5330 (2025). DOI 10.15376/biores.20.3.5315-5330.
10. N. Saadaoui, A. Rouilly, K. Fares, L. Rigal, *Materials and Design*, **50**, 302-308 (2013). DOI: 10.1016/j.matdes.2013.03.011.
11. V. S. Boltovskiy, *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technology, Biotechnology, Geoecology*, **2**, **247**, 5-12 (2021). DOI 10.52065/2520-2669-2021-247-2-5-12.
12. A.V. Artemov, V.G. Buryndin, P.S. Krivonogov et al., *Polymer Science. Series D*, **16**, 278-284 (2023).
13. D. Zhang, A. Zhang, L. Xue, *Wood Science and Technology*, **49**, 661-679 (2015). <https://doi.org/10.1007/s0022-6-015-0728-6>.
14. C.P. Araújo Junior, C.A.C. Coaquira, A.L.A. Mattos et al., *Waste Biomass Valoriz*, **9**, 2245-2254 (2018).
15. M. Nassar, G. MacKay, *Wood and Fiber Science*, **16**, 441-53 (1984).
16. M. Brebu, C. Vasile, *Cellulose Chemistry and Technology*, **44**, 9, 353-363 (2010).
17. D. Ciolkosz, R. Wallace, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **5**, 317-329 (2011).
18. V. M. Rezenkov, *Chemistry of Wood*, **3**, 3-23 (1977).
19. I.Ya. Klevinskaya, A.P. Treimanis, A.Ya. Alksne et al., *Chemistry of Wood*, **1**, 57–65 (1991).
20. P.V. Kolosov, N.G. Bazarnova, V.I. Markin, *High-Molecular Weight Products of Carboxymethylation of Vegetable Raw Material with Sorption*. Barnaul, ASU, 2014. 134 p.
21. G. P. Sastry, *Holzforschung*, **23**, 1, 15-17 (1969).
22. P.K. Latysheva, A.V. Savinovskikh, A.V. Artemov et al., *Actual Problems of Modern Science, Engineering and Education*, **1**, 219-221 (2016).
23. A.V. Myalitsyn, *Methodology of Experiment Planning and Processing Results when Studying Technological Processes in Timber Industry*. Yekaterinburg, USFEU, 2023. 76 p.

24. N.M. Mukhin, A.E. Shkuro, A.V. Artemov et al. *Determination and Optimization of Pressing Parameters for Reactoplastics*. Yekaterinburg, USFEU, 2024. 70 p.
25. A.E. Shkuro, A.V. Artemov, N.S. Shtabnov, V.G. Buryndin, *Woodworking: Technologies, Equipment, Management of the XXI Century Conference Proceedings* (Yekaterinburg, Russia, September 13–15, 2025). USFEU, 2025, pp. 96–101.
26. A.E. Shkuro, O.F. Shishlov, V.V. Glukhikh, *Production and Determination of Chipboard Properties*. Yekaterinburg, USFEU, 2016. 30 p.
27. A.V. Artemov, A.E. Shkuro, V.G. Buryndin, V.E. Tsvetkov, *Adhesives. Sealants. Technologies*, **10**, 2-13 (2025). DOI 10.31044/1813-7008-2025-0-10-2-13.

---

© **А. В. Артёмов** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров» (ТЦБППП), Уральский государственный лесотехнический университет (УГЛУ), Екатеринбург, Россия, artemovav@m.usfeu.ru; **А. Е. Шкуро** – д-р техн. наук, профессор кафедры ТЦБППП, УГЛУ, shkuroae@m.usfeu.ru; **Т. В. Якубова** – канд. хим. наук, доцент кафедры «Химии и процессов горения», Уральский государственный институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, Россия, tatanaakubova71723@gmail.com; **В. Г. Бuryndин** – д-р техн. наук, профессор кафедры ТЦБППП, УГЛУ, buryndinvg@m.usfeu.ru.

© **A. V. Artyomov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the department of Technology of Pulp and Paper Industries and Polymer Processing (TPPIPP), Ural State Forest Engineering University (USFEU), Yekaterinburg, Russia, artemovav@m.usfeu.ru; **A. E. Shkuro** – Doctore of Sciences (Technical Sci.), Professor of the TPPIPP department, USFEU, shkuroae@m.usfeu.ru; **T. V. Yakubova** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of the department of Chemistry and Combustion Processes, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russia, tatanaakubova71723@gmail.com; **V. G. Buryndin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the TPPIPP department, USFEU, buryndinvg@m.usfeu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 17.02.26.

Дата принятия рукописи в печать – 13.03.26.