



Композиционный строительный материал с использованием отходов лесохимии в составе

© Г. П. Плотникова

Братский государственный университет, г. Братск, Россия

Резюме: Цель – разработка технологии производства бетонов и их составов с применением лигнина гидролизного как компонента, улучшающего их качественные характеристики (прочность при сжатии, водонепроницаемость, морозостойкость). Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи: исследовать химический состав гидролизного лигнина; выявить влияние процесса механохимической активации на структуру гидролизного лигнина; подобрать оптимальные условия получения композиционных строительных материалов; определить физико-механические свойства разработанных композиционных материалов. В опытах использовали портландцемент М 400, в качестве мелкого заполнителя – песок (ГОСТ 8736-2014) с модулем крупности 2,2 в соотношении 1:4 (т.к. ожидаемый класс бетона – В35), водоцементное отношение составило 0,5, использованы жидкое натриевое стекло (ГОСТ 13078-81) в количестве 10%, органический наполнитель – тонкомолотый гидролизный лигнин, органический модификатор – карбамид (ГОСТ 2081-92). При определении химического состава гидролизного лигнина использовался метод ИК-спектроскопии. Исследование показало, что гидролизный лигнин является активной органической добавкой. Наличие в его молекулах сильно полярных групп (гидроксильных, карбонильных, карбоксильных), способных к сильному межмолекулярному взаимодействию, может способствовать его ассоциации в растворах, привести к возможным реакциям сшивания цепей, реакциям «конденсации», причем как в кислой, так и в щелочной среде. Для получения качественных композиционных материалов строительного назначения с заранее заданными свойствами рекомендована сырьевая смесь, состоящая из портландцемента, песка и дополнительных компонентов: гидролизный лигнин в количестве 30–50% от массы смеси и карбамид в количестве 20–40% от массы смеси.

Ключевые слова: гидролизный лигнин, бетоны, цемент, карбамид, жидкое стекло

Для цитирования: Плотникова Г. П. Композиционный строительный материал с использованием отходов лесохимии в составе // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 3. С. 452–461. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-452-461>.

Composite building material containing wood chemistry waste

Galina P. Plotnikova

Bratsk State University, Bratsk, Russia

Abstract: The objective of this study is to develop a technology for manufacturing concretes and their formulations using hydrolysed lignin to improve their quality characteristics (compressive strength, water repellency, frost resistance). To achieve this goal, the following tasks should be solved: to study the chemical composition of hydrolysed lignin; to reveal the influence of mechanochemical activation on the structure of hydrolysed lignin; to select optimal conditions for obtaining composite building materials; to determine the physical and mechanical properties of the developed composite materials. Portland cement M 400 was used in the experiments; sand was used as a fine aggregate (GOST 8736-2014) with a fineness modulus of 2.2 at a ratio of 1:4 (the expected concrete grade is B35). The water-cement ratio was 0.5. 10% sodium water glass (GOST 13078-81), finely ground hydrolysed as lignin organic filler and carbamide (GOST 2081-92) as organic modifier were used. IR spectroscopy was used to determine the chemical composition of hydrolysed lignin. The study showed that hydrolysed lignin is an active organic additive. The polar groups (hydroxyl, carbonyl, carboxyl) in its molecule are capable of strong intermolecular interaction and can facilitate its association in solutions, leading to possible chain cross-linking reactions, condensation reactions, both in acidic and alkaline media. To obtain high-quality

construction composite materials with desired properties, the following raw mixture comprising Portland cement, sand and additional components is recommended: 30–50% of hydrolysed lignin and 20–40% of carbamide of the mixture mass.

Keywords: hydrolysis lignin, concrete, cement, carbamide, liquid glass

For citation: Plotnikova G. P. Composite building material containing wood chemistry waste. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(3):452-461. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-452-461>.

Введение

Реалии сегодняшнего дня таковы, что цены на основной компонент строительных материалов – цемент – значительно выросли и продолжают расти. В соответствии с направлениями концепции устойчивого развития, комплексное использование сырья, в том числе органических и минеральных отходов промышленности, и создание на его основе новых композиционных материалов с новыми физико-механическими свойствами, значительно улучшенными, с целью их дальнейшего использования в малоэтажном домостроении является важной и актуальной задачей. Отходы химической переработки древесины отличаются разнообразием свойств и могут стать эффективной добавкой в бетон. Положительный эффект предопределяется их химическим составом [1–4]. На территории России и бывшего Советского союза ранее функционировали 18 гидролизных заводов, и на сегодняшний день накоплено в отвалах около 95 млн тонн гидролизного лигнина, представляющего серьезную экологическую опасность. В научной литературе известно достаточно много трудов и патентов, подтверждающих возможность использования лигнина в промышленности, медицине, производстве удобрения, в качестве топлива, в составе битума при строительстве автодорог¹ [5–7]. Возможность использования гидролизного лигнина в составе материалов строительного назначения изучали такие ученые, как В.Ф. Завадский, В.М. Никифоров, Э.П. Плотни-

ков, В.М. Селиванов, А.А. Тинников, Т.Ю. Химерик, М.И. Чудаков. Однако проблема отвалов гидролизного лигнина, их самовозгорания на сегодняшний день до сих пор не решена и, согласно имеющимся данным, промышленное использование гидролизного лигнина не превышает 5%. Национальный проект «Жилье и городская среда» предусматривает «модернизацию строительной отрасли и повышение качества индустриального жилищного строительства, в том числе посредством <...> стимулирования внедрения передовых технологий в проектировании и строительстве»². Поэтому предпринята попытка вовлечения многотоннажных отходов лесохимического производства – гидролизного лигнина – в состав строительных материалов³ [8].

Методы

Для идентификации функциональных групп гидролизного лигнина из отвалов бывшего Канского биохимзавода использовался ИК-спектрометр модели *IRPrestige-21* (производство *Shimadzu*, Япония). Фурье-преобразователь прибора обеспечивает сканирование в широком диапазоне спектров (рис. 1). Принципом работы ИК-спектрофотометров является процесс поглощения в инфракрасном спектре молекулами вещества энергии электромагнитного излучения. Процесс поглощения происходит в результате колебаний атомов в молекулах. Имеющиеся в молекуле активные функциональные группы (карбонильные C=O, гидроксильные -OH, метиленовые CH₂ и др.) показы-

¹Ипатова Е.В. Деструкция и новые направления использования гидролизного лигнина: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Санкт-Петербург, 2017. 16 с.;

Магдалини А.А. Лигнобитумная теплогидроизоляция на органо-минеральном связующем для кровельных покрытий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1995. 16 с.;

Макарова И.А. Стеновая керамика с лигносодержащими добавками на основе продуктов сульфатной переработки древесины: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1993. 19 с.;

Соломонова Е.Б. Лигнополимерсиликатный арболит: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2004. 24 с.;

Федорова О.В. Многоступенчатое выделение лигнинного комплекса из черного щелока при производстве сульфатной целлюлозы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2020. 16 с.;

Шибяева Г.Н. Лигноминеральные шпатлевочные материалы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1998. 16 с.

²Национальный проект «Жилье и городская среда» [Электронный ресурс] // Минстрой России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/trades/natsionalnye-proekty/natsionalnyy-proekt-zhilye-i-gorodskaya-sreda/> (11.06.2021).

³Шурышева Г.В. Лигнополимерсиликатная композиция для защиты бетона от органической коррозии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2008. 22 с.

вают колебания на определенной частоте. Прибор к работе готовят следующим образом: сначала его калибруют по полистирольной пленке в соответствии с программным обеспечением *IRsolution*, снимают фоновый спектр без образца и фиксируют его. После этого уже считывают спектр вещества, подлежащего измерению. Пробу для анализа готовят следующим образом: искомое вещество берут в количестве 1–3 мг, растирают пестиком в агатовой ступке и приливают 3–5 капель вазелинового масла (допускается использовать силиконовое

или парафиновое масла). В получившуюся суспензию затем добавляют бромистый калий из расчета: на 1–2 мг вещества расходуется 300 мг калия бромистого. После этого смесь прессуют под давлением, образуя таблетки. Искомую таблетку далее помещают в кюветное отделение прибора и записывают спектр пропускания в диапазоне 4000–400 см⁻¹. Далее производят расчет спектра с помощью программного обеспечения *IRsolution*, а реакционные группы в спектрах идентифицируют из библиотеки.



Рис. 1. ИК-спектрофотометр Shimadzu (Япония)
Fig. 1. IR spectrophotometer Shimadzu (Japan)

Для исследований использовали гидролизный лигнин Канского биохимзавода, пролежавший в отвале более 10 лет. Была осуществлена подготовка гидролизного лигнина, которая заключалась в процессе механоактивации на роторно-вихревой мельнице. Схема работы мельницы отражена на рис. 2. Проведение такой предварительной обработки представляется нам важным, потому что может способствовать стабилизации гранулометрического состава и усреднению влажности искомого лигнина⁴. Композиционный материал испытывали в возрасте 28 сут. Прочность бетона определяли по показателю «предел прочности при одноосном сжатии» по ГОСТ 25820-2014. Скорость нагружения образцов составляла 5–10 мм/мин. Водопоглощение определяли методом вымачивания в течение 24 ч (ускоренный метод).

Результаты и их обсуждение

Механоактивированный гидролизный лигнин является аморфным веществом и представляет собой порошок от светло-кремового до темно-коричневого цвета, обладает специфическим запахом. В составе гидролизного лигнина обнаруживаются:

- собственно лигнин – 40–88%;
- трудногидролизуемые полисахариды – 13–45%;

- смолистые соединения и вещества лигнуминового комплекса – 5–19%;
- зольные элементы – 0,5–10%.

Многие исследователи отмечают, что лигнин является гигроскопичным веществом и обладает хорошей сорбционной способностью [9]. Лигнин склонен к самовоспламенению, в составе аэрозолей способен к взрыванию. Лигнин воспламеняется при температуре 195°C, самовоспламеняется при 425°C, тлеет при 185°C. Плотность лигнинного вещества составляет 1,33–1,34 г/см³, насыпная плотность – 190–220 кг/м³, размер частиц лигнина – 10–100 мкм, pH водного раствора – 6,2. Гидролизный лигнин является полимером, состоящим из фенилпропановых структурных единиц, он имеет ароматическую природу. Использование гидролизного лигнина на сегодняшний день ограничено наличием серной кислоты, однако известно, что у лигнина развита капиллярная структура. Высказано предположение, что лигнин, пролежавший в отвалах более 10 лет, возможно, не имеет свободной серной кислоты [10], что за многолетнее «вылеживание» естественным путем происходит вымывание примесей атмосферными осадками.

⁴Просвирников Д.Б. Переработка лигноцеллюлозной биомассы, активированной методом паровзрывной обработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2019. 40 с.

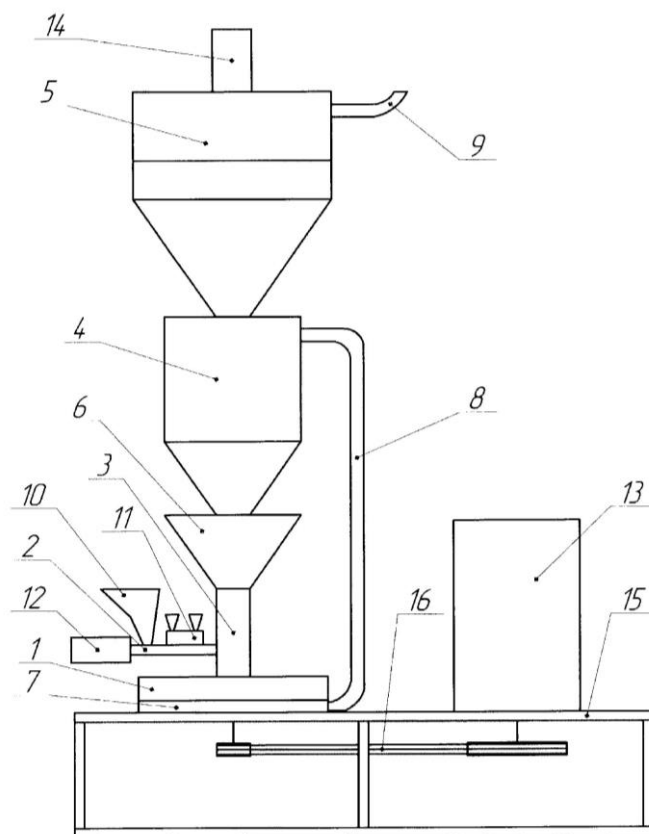


Рис. 2. Схема работы роторно-вихревой мельницы:

1 – камера помола; 2 – шнек для подачи сырья; 3 – патрубок; 4 – сепаратор для газации (циклон); 5 – аэродинамический сепаратор; 6 – камера для стабилизации; 7 – камера для материала, не прошедшего сепарацию (подготовка к аспирации); 8 – пневмотранспорт; 9 – патрубок для отвода измельченного материала; 10 – устройство для загрузки; 11 – дозатор для подачи дополнительного материала; 12, 13, 14 – двигатели; 15 – рама; 16 – ременная передача

Fig. 2. Operation diagram of rotor-vortex mill:

1 – grinding chamber; 2 – feed screw; 3 – nozzle; 4 – gasification separator (cyclone); 5 – aerodynamic separator; 6 – stabilization chamber; 7 – chamber for non-separated material (preparation for aspiration); 8 – pneumatic transport; 9 – branch pipe for removal of crushed material; 10 – loading device; 11 – dosing device for supply of additional material; 12, 13, 14 – motors; 15 – frame; 16 – belt transmission

Возможно, снижение кислотности лигнина происходит в результате вымывания углеводных и фенольных примесей. При этом сохраняются гетерокапиллярная структура лигнина и большое количество наноразмерных пустот. Возможное использование такого вида сырья, подготовленного природой, позволит исключить стадию нейтрализации свободной кислоты и удаления низкомолекулярных продуктов, заключающуюся в промывке лигнина.

После проведения механоактивации гидролизный лигнин представляет собой мелкодисперсный порошок коричневого цвета однородной консистенции. Средний размер его частиц составляет 5 мкм. Удельная поверхность лигнина до и после микронизации – 9,6 м²/г и 18,9 м²/г соответственно. Таким образом, механоактивация увеличивает удель-

ную поверхность гидролизного лигнина и снижает количество остаточных полисахаридов, что является перспективным при его возможном использовании в технологическом процессе изготовления композиционных строительных материалов. Кроме того, при механоактивации лигнин повышает свою гидрофобность, на его поверхности появляются активные центры, что, вероятно, может положительно повлиять на его сорбционные свойства [11–14].

В ИК-спектре гидролизного лигнина из отвалов бывшего биохимзавода (г. Канск) идентифицированы следующие функциональные группы (рис. 3):

– свободные гидроксильные группы (3696,64 см⁻¹ и 3620,45 см⁻¹);

- гидроксильные фенольные группы ($3696,64\text{ см}^{-1}$ и $3620,45\text{ см}^{-1}$);
- группы -C-O- и группы C-H двойной связи ($1418,67\text{ см}^{-1}$);
- метиленовые -CH₂- связи ($2921,24\text{ см}^{-1}$, $2851,8\text{ см}^{-1}$);
- связанные гидроксильные группы во внутрикомплексных соединениях ($2514,25\text{ см}^{-1}$);
- галогенангидриды насыщенных и ненасыщенных кислот и карбонильные группы C=O ($1795,76\text{ см}^{-1}$);

- колебания ароматического кольца ($1626,98\text{ см}^{-1}$);
- колебания ацеталей -C-OH ($950,92\text{ см}^{-1}$);
- симметричные колебания кольца ($913,31\text{ см}^{-1}$);
- колебания C-H в производных бензола ($873,77\text{ см}^{-1}$, $798,54\text{ см}^{-1}$ и $778,29\text{ см}^{-1}$);
- деформационные колебания связей C-H и C-O ($873,77\text{ см}^{-1}$);
- маятниковые CH₂ колебания ($778,29\text{ см}^{-1}$).

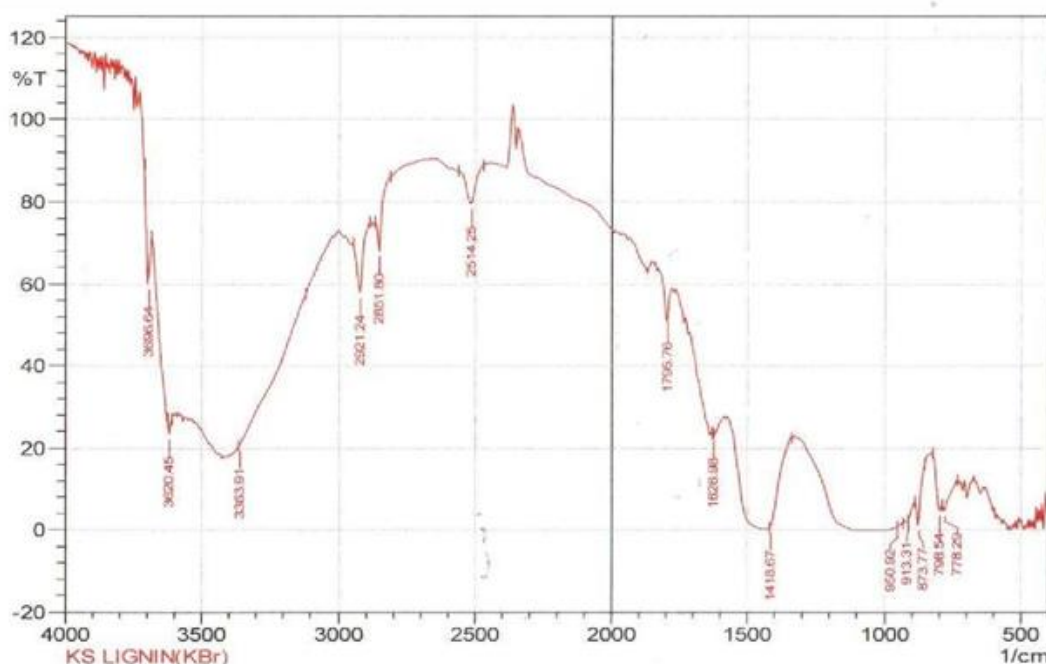


Рис. 3. ИК-спектр гидролизного лигнина
Fig. 3. IR spectrum of hydrolysis lignin

Анализируя химический состав лигнина по ИК-спектру, можно увидеть, что в его спектре есть только ангидриды кислот и нет свободной серной кислоты, что подтверждается также измерением водородного показателя его водного раствора ($pH = 6,2$).

Процесс снижения кислотности, вероятно, связан с блокировкой гидроксильных групп фенольной природы и декарбоксилированием карбоксильных групп. Эти группы гидрофильны, и в результате, после вымывания осадками, вероятно, в лигнине происходит конденсация простых эфирных связей, которые являются гидрофобными.

На рис. 4 показаны результаты определения предела прочности при одноосном сжатии, МПа (по ГОСТ 10180-90), в зависимости от состава композиции бетона. На основании проведенных исследований можно заключить,

что лигнин является активным заполнителем в процессе взаимодействия сильно полярных групп с гидроксидом кальция цемента, что дает основания предполагать возможность его применения в качестве наполнителя цементно-песчаной смеси с целью экономии дорогого цемента. Плотность полученного легкого бетона составила $1400\text{--}1450\text{ кг/м}^3$, а показатель предела прочности на сжатие – $40\text{--}45\text{ МПа}$.

Таким образом, при введении $30\text{--}50\%$ механоактивированного лигнина прочность при одноосном сжатии образцов увеличивается на 17% , значит, добавление механоактивированного лигнина усиливает когезию вяжущего, а следовательно, гидролизный лигнин является эффективным модификатором строительной композиции⁵ [14].

⁵Киселев В.П. Комплексное использование отходов химической переработки биомассы дерева и других вторичных ресурсов в производстве композиционных вяжущих и материалов, полученных на их основе: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. Красноярск, 2006. 44 с.

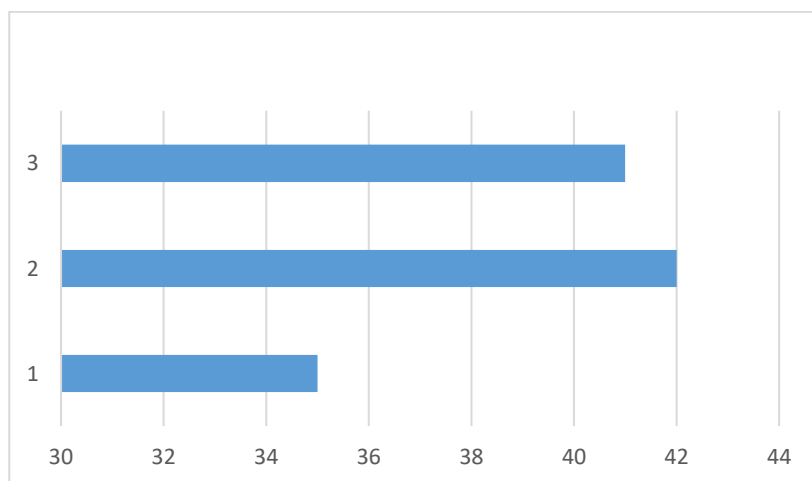


Рис. 4. Предел прочности при одноосном сжатии, МПа (по ГОСТ 10180-90), в зависимости от состава композиции: 1 – чистый бетон; 2 – бетон с заменой 30% портландцемента на гидролизный лигнин; 3 – бетон с заменой 20% портландцемента на карбамид

Fig. 4. Ultimate strength at uniaxial compression, MPa (as per GOST 10180-90), depending on the composition: 1 – pure concrete; 2 – concrete with replacement of 30% Portland cement with hydrolysis lignin; 3 – concrete with replacement of 20% Portland cement with carbamide

Водорастворимый карбамид-мономер также является модификатором, он склонен к полимеризации (поликонденсации) под влиянием щелочной среды жидкого стекла, поэтому введение карбамида в состав бетона в количестве 20% способствует увеличению прочности на сжатие на 20%. Введение лигнина с карбамидом повышает и водостойкость вяжущего. При формировании композиции с 30% лигнина и 20% карбамида коэффициент водостойкости составляет 0,84–0,88, кроме того, снижается водопоглощение в 1,44 раза.

При использовании карбамида в составе композиции снижается ее водопотребность. Так, использование карбамида в количестве

30% от массы цемента требует водоцементного отношения 0,5, а при использовании карбамида в количестве 40% водоцементное отношение снижается до 0,4.

Далее был поставлен двухфакторный эксперимент и определена прочность бетона при одноосном сжатии при совместном действии двух факторов – гидролизного лигнина и карбамида (табл. 1, 2).

Математическое описание зависимости предела прочности при одноосном сжатии от варьируемых технологических параметров представлено в виде нормализованного уравнения регрессии:

$$Y_1 = 73,25 - 1,169 X_1 + 1,169 X_2 - 6,25 X_1^2 - 8,25 X_2^2 - 0,25 X_1 \cdot X_2$$

По уравнению регрессии были получены графические зависимости, представленные на рис. 5–7.

На основании проведенных экспериментов можно увидеть, что содержащиеся в композиции лигнин и карбамид, действуя совместно, усиливают друг друга, что подтверждается

увеличением прочности при сжатии в 1,5–1,7 раза. Результаты экспериментов подтверждают предположение о том, что полярные группы лигнина, взаимодействуя с гидроксильными кальция цемента, создают дополнительные сшивки, а карбамид, склонный к поликонденсации, улучшает пластичность бетона.

Таблица 1. Управляемые факторы и уровни их варьирования

Table 1. Controlled factors and levels of their variation

Наименование фактора	Кодовое обозначение	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
Содержание гидролизного лигнина в составе композиции (от массы портландцемента), %	X_1	30	40	50	10
Содержание карбамида в составе композиции (от массы портландцемента), %	X_2	20	30	40	10

Таблица 2. Матрица планирования и результаты экспериментальных исследований по В-плану второго порядка

Table 2. Planning matrix and results of experimental studies on the second-order B-plan

№ опыта	X_1		X_2		Y_1 , прочность при одноосном сжатии, МПа
	В нормализованном выражении	В натуральном выражении	В нормализованном выражении	В натуральном выражении	
1	-1	30	-1	20	58
2	+1	50	-1	20	56
3	-1	30	+1	40	62
4	+1	50	+1	40	59
5	-1	30	0	30	68
6	+1	50	0	30	66
7	0	40	-1	20	65
8	0	40	+1	40	65

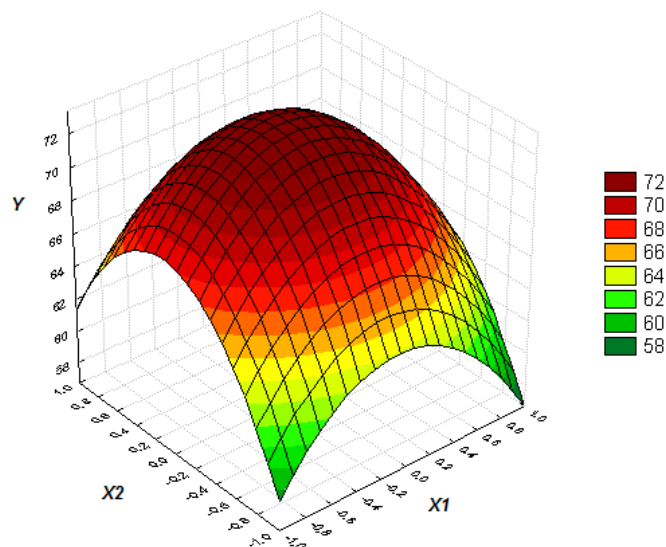


Рис. 5. Графическая зависимость прочности бетона при одноосном сжатии от варьируемых факторов:

Y – прочность при одноосном сжатии, МПа; X_1 – содержание гидролизного лигнина в составе композиции (от массы ПЦ); X_2 – содержание карбамида в составе композиции (от массы ПЦ), %

Fig. 5. Graphical dependence of concrete strength at uniaxial compression from variable factors:

Y – strength in uniaxial compression, MPa; X_1 – the content of hydrolysis lignin in the composition (based on the weight of the PC); X_2 – urea content in the composition (based on the weight of PC), %

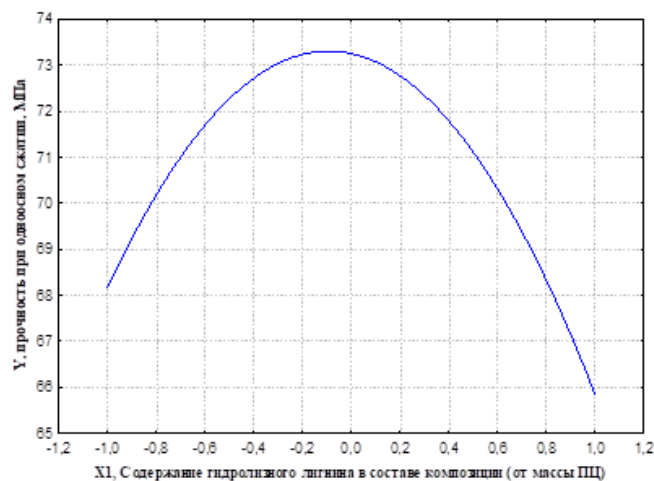


Рис. 6. Графическая зависимость прочности бетона при одноосном сжатии от доли гидролизного лигнина в составе композиции при содержании карбамида в составе композиции, равном 30%

Fig. 6. Graphical dependence of concrete strength at uniaxial compression on the proportion of hydrolysis lignin in composition with carbamide content in composition equal to 30%

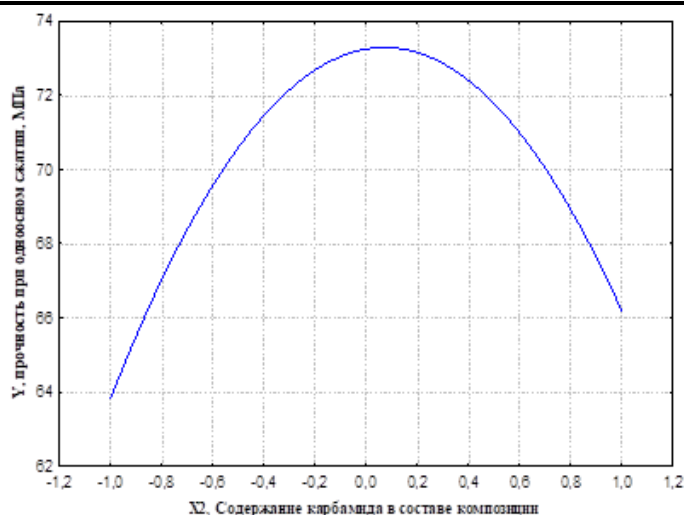


Рис. 7. Графическая зависимость прочности бетона при одноосном сжатии от доли карбамида в составе композиции при содержании лигнина в составе композиции, равном 40%
Fig. 7. Graphical dependence of concrete strength at uniaxial compression on the proportion of carbamide in composition with lignin content in composition equal to 40%

Закключение

Таким образом, в ходе исследования был определен химический состав отхода Канского биохимзавода – гидролизного лигнина – и проведены эксперименты по определению прочности бетона при одноосном сжатии, в зависимости от состава композиции, по результатам которых было установлено, что:

1) гидролизный лигнин является хорошим микронаполнителем цементного вяжущего. Он способствует упрочнению структуры вяжущего, и кроме того, благодаря высокопористому строению частиц, – улучшению свойств композиции, их химической стойкости и водостойкости;

2) гидролизный лигнин повышает прочность цементного вяжущего, усиливает коге-

зию композиционного материала и повышает водостойкость. Оптимальное количество лигнина в композиции – 40%;

3) карбамид также является хорошим модификатором бетонов, введение его в состав бетона в количестве 30% способствует увеличению прочности на сжатие на 20%;

4) совместное действие двух модификаторов способствует возникновению эффекта пластификации конструкционного композиционного строительного материала, так как карбамид способен конденсироваться (полимеризоваться), и кроме этого, происходит взаимодействие полярных групп лигнина с гидроксильными группами кальция с образованием дополнительных сшивок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крутов С.М., Ипатова Е.В., Косяков Д.С., Шкаева Н.В., Короткова Е.М., Пранович А.В. и др. Лигнопенополиуретаны на основе гидролизного лигнина // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 1. С. 128–133.
2. Крутов С.М., Ипатова Е.В. Перспективы получения новых материалов на основе отходов биохимической переработки древесного сырья // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы научнотехнической конференции (Санкт-Петербург, 13–15 апреля 2016 года). Санкт-Петербург, 2016. С. 207–209.
3. Федорова О.В., Аким Э.Л. Гидролизный и сульфатный лигнин, как перспективное сырье для биотоплива // Леса России: политика,

промышленность, наука, образование: материалы IV научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 22–25 мая 2019 год). Санкт-Петербург, 2019. С. 325–327.

4. Шибаева Г.Н., Ибе Е.Е., Холдаенко Ю.А., Филимонова В.А. Теплоэффективные строительные материалы на основе полимерсилкатного вяжущего и гидролизного лигнина // Инновации в жизнь. 2017. № 3 (22). С. 162–172.

5. Dessbesell L., Leitch M., Pulkki R., Paleologou M., Xu C. Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers // Renewable and sustainable energy reviews. 2020. Vol. 123. p. 109768. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109768>.

6. Chio C., Qin W., Sain M. Lignin utilization: a review of lignin depolymerization from various aspects // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2019. Vol. 107. p. 232–249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.008>.

7. Bogdanovich N.I., Vorontsov K.B., Labudin B.V., Varenik K.A. Simulating the pyrolysis process of sludge – lignin with the production of active carbons // *IOP conference series: materials science and engineering*. 2020. Vol. 939. p. 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012014>.

8. Verevkin S.P., Konnova M.E., Turovtsev V.V., Riabchunova A.V., Pimerzin A.A. Weaving a network of reliable thermochemistry around lignin building blocks: methoxy-phenols and methoxybenzaldehydes // *Industrial and engineering chemistry research*. 2020. Vol. 59. № 52. p. 22626–22639. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04281>.

9. Fux S.L., Devyaterikova S.V., Musikhina T.A. Geosorbent based on the combination of Kuznetsk-basin coal fly ash with various kinds of lignin // *IOP conference series: earth and environmental science*. 2019. Vol. 272. p. 022053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022053>.

10. Плотникова Г.П., Плотников Н.П. Модификация связующего для использования некондиционного сырья в производстве древесностружечных плит // *Системы. Методы. Технологии*. 2013. № 2. С. 142–146.

11. Lee H., Feng X., Mastalerz M., Feakins S.J. Characterizing lignin: combining lignin phenol, methoxy quantification, and dual stable carbon and hydrogen isotopic techniques // *Organic geochemistry*. 2019. Vol. 136. p. 103894. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2019.07.003>.

12. Плотникова Г.П., Плотников Н.П., Кузьминых Е.А. Применение гидролизного лигнина в производстве древесно-полимерных композитов // *Системы. Методы. Технологии*. 2013. № 4. С. 133–138.

13. Плотников Н.П., Плотникова Г.П. Совершенствование технологии производства древесноплитных материалов: монография. Новосибирск: НП «СибАК», 2013. 112 с.

14. Ghorbani M., Liebner F., Van Herwijnen H.W.G., Pfungen L., Krahofer M., Budjav E., et al. Lignin phenol formaldehyde resoles: the impact of lignin type on adhesive properties // *Bioresources*. 2016. Vol. 11. № 3. p. 6727–6741. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.6727-6741>.

REFERENCES

1. Krutov SM, Ipatova EV, Kosyakov DS, Shkaeva NV, Korotkova EM, Pranovich AV, et al. Lignopolyurethane foam based on hydrolytic lignin. *Zhurnal prikladnoi khimii = Journal of Applied Chemistry*. 2016;89(1):128-133. (In Russ.).

2. Krutov SM, Ipatova EV. Prospects for obtaining new materials based on waste from biochemical processing of wood raw materials. *Perspektivy polucheniya novykh materialov na osnove otkhodov biokhimicheskoi pererabotki drevesnogo syr'ya* (St. Petersburg, 13–15 April 2016). St. Petersburg, 2016. p. 207-209. (In Russ.).

3. Fedorova OV, Akim EL. Hydrolysis and sulfate lignin, as promising raw materials for biofuels. *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy IV nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (St. Petersburg, 22–25 May 2019). St. Petersburg, 2019. p. 325-327. (In Russ.).

4. Shibaeva GN, Ibe EE, Kholdaenko YuA, Filimonova VA. Heat-efficient building materials based on polymer-silicate binder and hydrolytic lignin. *Innovatsii v zhizn' = Innovations in life*. 2017;3(22):162-172. (In Russ.).

5. Dessbesell L, Leitch M, Pulkki R, Paleologou M, Xu C. Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers. *Renewable and sustain-*

able energy reviews. 2020;123:109768. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109768>.

6. Chio C, Qin W, Sain M. Lignin utilization: a review of lignin depolymerization from various aspects. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2019;107:232-249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.008>.

7. Bogdanovich NI, Vorontsov KB, Labudin BV, Varenik KA. Simulating the pyrolysis process of sludge – lignin with the production of active carbons. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2020;939:012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012014>.

8. Verevkin SP, Konnova ME, Turovtsev VV, Riabchunova AV, Pimerzin AA. Weaving a network of reliable thermochemistry around lignin building blocks: methoxy-phenols and methoxybenzaldehydes. *Industrial and engineering chemistry research*. 2020;59(52):22626-22639. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04281>.

9. Fux SL, Devyaterikova SV, Musikhina TA. Geosorbent based on the combination of Kuznetsk-basin coal fly ash with various kinds of lignin. *IOP conference series: earth and environmental science*. 2019;272:022053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022053>.

10. Plotnikova GP, Plotnikov NP. Modification of binder to use off-grade raw materials in chip-

board production. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = *Systems. Methods. Technology*. 2013;2:142-146. (In Russ.).

11. Lee H, Feng X, Mastalerz M, Feakins SJ. Characterizing lignin: combining lignin phenol, methoxy quantification, and dual stable carbon and hydrogen isotopic techniques. *Organic geochemistry*. 2019;136:103894. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2019.07.003>.

12. Plotnikova GP, Plotnikov NP, Kuzminykh EA. Use of hydrolized lignin in wood-polymer composites production. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* =

Systems. Methods. Technology. 2013;4:133-138. (In Russ.).

13. Plotnikov NP, Plotnikova GP. Improving the technology for the production of wood-plate materials: monograph. Novosibirsk: NP SibAK; 2013. 112 p. (In Russ.).

14. Ghorbani M, Liebner F, Van Herwijnen HWG, Pfungen L, Krahofer M, Budjav E, et al. Lignin phenol formaldehyde resoles: the impact of lignin type on adhesive properties. *Bioresources*. 2016;11(3):6727-6741. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.6727-6741>.

Сведения об авторе

Плотникова Галина Павловна,
кандидат технических наук,
магистрант,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия,
e-mail: galina.pavlovna.plotnikova@yandex.ru

Information about the author

Galina P. Plotnikova,
Cand. Sci. (Eng.),
master's degree,
Bratsk State University,
40 Makarenko Str., Bratsk, 665709, Russia,
e-mail: galina.pavlovna.plotnikova@yandex.ru

Заявленный вклад автора

Плотникова Г. П. провела исследования, подготовила статью к публикации, владеет авторскими правами на статью и несет ответственность за плагиат.

Contribution of the author

Plotnikova G. P. has conducted the studies, prepared the article for publication, owns the copyright to the article and is responsible for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов относительно публикации данной статьи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 28.05.2021.
Одобрена после рецензирования 28.06.2021.
Принята к публикации 02.07.2021.

The article was submitted 28.05.2021.
Approved after reviewing 28.06.2021.
Accepted for publication 02.07.2021.