

Применение методов нечеткой логики для прогноза прочности древесно-минерального композита

С.Н. Долматов^{1а}, Т.С. Бабкина^{2б}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

² Нижегородский филиал Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», ул. Большая Печерская, 25/20, Нижний Новгород, Россия

^а pipinaskus@mail.ru, ^б ttabkina@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>, ^б orcid.org/0000-0003-2892-8831

Статья поступила 24.01.2024, принята 29.01.2024

Древесно-минеральные композиты являются перспективным строительным материалом. Сочетание высоких теплоизоляционных показателей, экологичности, простой технологии производства, возможности вовлечения в производство низко-товарной древесины и древесных отходов позволяет найти применение такой технологии в сфере гражданского и промышленного строительства. Древесина, являясь продуктом жизнедеятельности растительных клеток, в своем составе содержит сахара и водорастворимые вещества, ухудшающие условия набора прочности гидратируемых вяжущих и поэтому весьма нежелательные в древесно-минеральном композите. Наиболее простой и недорогой путь снижения такого влияния — длительная выдержка древесных материалов на складах открытого хранения. В значительной степени прочность древесно-минерального композита будет зависеть от времени выдержки на таких складах. Данный вопрос в настоящее время изучен недостаточно. В работе решается задача определения прочностных параметров древесно-минерального композита в зависимости от времени выдержки на складах открытого хранения на основе методов моделирования и аппарата теории нечетких множеств. Модель нечеткой логики разработана средствами Fuzzy Logic пакета Matlab. Были приняты логические переменные, разработаны правила нечеткого вывода. Выполненные процедуры нечеткого моделирования позволили получить модель прогнозирования показателей прочности древесно-минерального композита в зависимости от времени и температуры выдержки древесного наполнителя. Исследования проводились для древесно-минерального композита — опилкобетона. Отклонения величин предела прочности при сжатии образцов, определенных по модели нечеткой логики и полученных экспериментально, составили от 3 до 39 %. Установлено: чем больше срок выдержки опилок на площадке хранения — тем выше прочность образцов опилкобетона. Зависимость эта нелинейна. Срок хранения до 120 суток оказывает меньшее влияние, чем срок хранения от 120 до 180 суток. Материалы работы могут использоваться для прогнозирования показателей древесно-минерального композита, изготовленного из древесных компонентов с различными сроками кучевого хранения, как способ моделирования технологического процесса методами и инструментами нечеткого вывода.

Ключевые слова: древесно-минеральный композит; переменная лингвистическая; кучевое хранение на открытом воздухе; нечеткая модель; моделирование нечеткое.

Application of fuzzy logic methods to predict the strength of wood-mineral composite

S.N. Dolmatov^{1а}, T.S. Babkina^{2б}

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia

² Nizhny Novgorod Branch of the National Research University "Higher School of Economics"; 25/12, Bolshaya Pecherskaya St., Nizhniy Novgorod, Russia

^а pipinaskus@mail.ru, ^б ttabkina@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>, ^б orcid.org/0000-0003-2892-8831

Received 24.01.2024, accepted 29.01.2024

Wood-mineral composites are a promising building material. The combination of high thermal insulation properties, environmental friendliness, simple production technology, and the possibility of using low-value wood and wood waste in production makes it possible to find the use of such technology in the field of civil and industrial construction. Wood, being a product of the vital activity of plant cells, contains sugars and water-soluble substances that worsen the conditions for the development of strength of hydrated binders and are, therefore, very undesirable in a wood-mineral composite. The simplest and most inexpensive way to reduce this impact is long-term aging of wood materials in open storage warehouses. To a large extent, the strength of the wood-mineral composite will depend on the exposure time in such warehouses. This issue has not been sufficiently studied at present. The work solves the problem of determining the strength parameters of a wood-mineral composite depending on the holding time in open storage warehouses based on modeling methods and the apparatus of fuzzy set theory. The fuzzy logic model is designed using Fuzzy Logic in Matlab. Logical variables are adopted and fuzzy inference rules are developed. The performed fuzzy modeling procedures make it possible to obtain a model for pre-

dicting the strength indicators of a wood-mineral composite depending on the time and temperature of exposure of the wood filler. The studies are carried out for a wood-mineral composite – sawdust concrete. Deviations in the values of the ultimate compressive strength of samples determined using a fuzzy logic model and obtained experimentally range from 3 to 39%. It has been established that the longer the sawdust is kept at the storage site, the higher the strength of the sawdust concrete samples is. This dependence is nonlinear. A storage period of up to 120 days has less impact than a storage period of 120 to 180 days. The materials of the work can be used to predict the performance of a wood-mineral composite made from wood components with different periods of heap storage, as a way to model the technological process using fuzzy inference methods and tools.

Keywords: wood-mineral composite; linguistic variable; open heap storage; fuzzy model; fuzzy modeling.

Введение. Технология производства древесно-минеральных композиционных материалов с использованием гидратируемых вяжущих веществ предусматривает соответствующую подготовку древесного заполнителя. Необходимость такой подготовки объясняется тем, что в составе древесины имеются химические соединения, оказывающие негативное влияние на процесс формирования композита.

Древесина и минеральные вяжущие вещества, являясь соответственно органическими и неорганическими материалами, принципиально отличаются по химическим и физическим свойствам. Свойства древесно-цементного композиционного материала начали исследоваться в начале XX в. В работе [1] была предложена гипотеза о причинах недостаточной прочности такого композита, существенно меньшей, чем прочность исходных компонентов, сводящейся к влиянию химического состава древесины.

Клеточные оболочки древесины состоят в основном из целлюлозы, лигнина, гемицеллюлозы, экстрактивных и минеральных веществ. Около 50 % массы древесины составляет целлюлоза, 30 % — лигнин. Экстрактивные вещества составляют от 2 до 2,5 % массы дерева. Остальная часть (от 10 у ели до 23 % у осины) — это полисахариды или гемицеллюлозы [2]. Гемицеллюлозы весьма неустойчивы в щелочной среде, формируемой при гидратации портландцемента. В такой среде полисахариды подвергаются гидролизу и переходят в водорастворимые сахара. Эти сахара негативно влияют на прочностные показатели древесно-минерального композита. Альдегидная группа сахаров, или сорбит, при значительных концентрациях способна практически полностью приостановить процесс схватывания и набора прочности цемента в древесно-минеральном композите [3; 4].

Известно, что сахара существенно ухудшают процесс гидратации цемента, однако досконально этот механизм пока не исследован. Древесная продленка может изготавливаться из целого ряда древесных пород, которые имеют индивидуальный химический состав, различное процентное содержание водорастворимых веществ, оказывающих негативное влияние на процесс гидратации. К таким соединениям можно отнести фенолы, дубильные экстракты, камеди, кислоты [5].

Согласно требованиям [6], содержание водорастворимых редуцирующих веществ не должно быть более 2 %. Этот показатель не является браковочным признаком, но существенно влияет на прочностные показатели, сроки схватывания и набора прочности. Задача снижения негативного влияния водорастворимых веществ и гемицеллюлозы решается несколькими способами (вымачивание, минерализация, обработка солями), и самый простой и недорогой способ — дли-

тельная выдержка на площадках открытого хранения. При открытом кучевом хранении измельченной древесины в течение нескольких месяцев происходят естественные процессы брожения, окисления, кристаллизации. При этом часть водорастворимых соединений вымывается, часть переходит в нерастворимые формы. Как недостаток технологии локализации гемицеллюлоз в процессе длительной выдержки (до полугода) измельченной древесины можно отметить необходимость значительных территорий для организации складов кучевого хранения. Однако для условий СФО вопрос ограничения территории складирования не является первостепенным, поэтому технология естественной выдержки может иметь экономические преимущества по сравнению с более широко распространенными химическими способами обработки измельченного древесного сырья.

Для практического применения требуется обоснование времени и условий выдержки древесного заполнителя на складах хранения для обеспечения гарантированных физико-механических показателей древесно-минерального композита. Такое обоснование обычно формулируется в виде математических зависимостей. Математическое описание требует значительного объема выборки из натуральных физических экспериментов. Современные методы моделирования, а именно теория нечетких множеств, имеют возможность практического решения задач, основываясь на выборках ограниченного объема. Анализ работ [7–10] позволяет сделать вывод о перспективности этого метода для решения прикладных задач в области производства древесно-минеральных композитов.

Цель и задачи исследования. На основе методов нечеткого моделирования разработать методику определения прочностных показателей древесно-минерального композита в зависимости от времени выдержки древесного наполнителя в кучах открытого хранения и температуры окружающей среды в момент этого хранения.

Задачи исследования:

1. Обоснование и проведение физической части цели исследования.
2. Формулирование элементов нечеткой логики, входных и выходных переменных, разработка функций принадлежности, базы правил.

3. Объединение операторов в систему и решение методами математического моделирования.

Объекты и методы исследований. Объектом исследования является влияние времени и температуры выдержки на складах открытого кучевого хранения древесного заполнителя на прочностные показатели древесно-минерального композиционного материала, изготовленного на основе этого заполнителя. В каче-

стве материала для исследования принят опилкобетон. С некоторой корректировкой материалы можно интерполировать для арболита, ксилолита. В работе использованы методы нечеткой логики, реализованные в прикладном пакете *Fuzzy Logic Matlab*.

Практическое применение материалов исследования позволит прогнозировать прочностные показатели древесно-минеральных композитов при изменении сроков и температурных условий хранения древесного наполнителя на складах открытого кучевого хранения.

Постановка задачи. Постановка задачи в содержательном виде предусматривает формулировку практической части исследования в виде натуральных экспериментов, наблюдений, описаний. Производится описание состояния объекта исследования и изменения этого состояния в зависимости от меняющихся факторов. В формализованной части предусмотрено обоснование правил и методов нечеткой логики, математическое моделирование специфических закономерностей и особенностей поведения древесно-минерального композита. Технологический процесс производства композиционных материалов на основе древесной дробленки и цемента состоит из подготовки древесного заполнителя, вяжущих веществ, минерализаторов, нейтрализаторов сахаров, смешивания, формовки, набора прочности, упаковки и складирования.

Физико-механические свойства древесно-минерального композита зависят от таких факторов, как рецептура смеси (процентное соотношения вяжущего вещества, минеральных и органических компонентов, добавок), водоцементное соотношение, условия набора прочности, качество подготовки древесного заполнителя. При подготовке древесной части композита древесина подвергается измельчению до древесной щепы, дробленки или опилок фракции оптимального размера, обеспечивающей запланированные свойства материала. Щепа, дробленка или опилки могут обрабатываться растворами солей, минерализаторами, эмульсиями для снижения негативного влияния водорастворимых веществ, сахаров, таннидов, масел. Самый простой и недорогой способ — выдержка древесины на складах открытого хранения. Предположим, что будут изменяться только факторы, связанные с изменением химического состава клеток древесины и его влиянием на формирование древесно-минерального композита. Отследить непосредственное изменение химического состава весьма сложно и трудоемко. Поэтому будем оценивать прочностные показатели древесно-минерального композита, изготовленного на основе древесных частиц с различными сроками выдержки на складе открытого хранения. Другие факторы зафиксируем на постоянном уровне. Работу проводим на основе древесно-минерального композита — опилкобетона. Опилкобетон — это древесно-минеральный композит, основными компонентами которого являются опилки, песок, цемент, вода и добавки.

Результаты и их обсуждение. Для возможности оценки влияния сроков хранения древесины на показатели прочности при изготовлении образцов минерализаторы из рецептуры были полностью исключены. Для получения образцов достаточной прочности было несколько увеличено содержание портландцемента. Для

проведения экспериментальной части были изготовлены образцы опилкобетона с последующим испытанием материала в лаборатории. Образцы были приготовлены на основе опилок из сосны (ленточное лесопиление, фракция опилок от 1 до 3 мм), портландцемента ПЦ 500, песка (зерно от 1 до 2 мм) и воды. Доли компонентов смеси в пересчете на 1 м³ составляли: опилки — 250 кг, портландцемент — 300 кг, песок — 400 кг. В целом рецептура соответствует опилкобетону М30. Водоцементное соотношение не нормировалось, оно устанавливалось исходя из подвижности смеси, возможности укладки в форму и трамбовки.

Древесные опилки были получены на лесопильном предприятии в процессе лесопиления в различные времена года. Всего было проведено три опыта. Сроки выдержки в куче хранения составляли 60, 120, 180 дней. Влияние температуры и погодных условий было учтено введением условных понятий «низкая», «средняя» и «высокая» температура (подразумевается начальная температура опилок). Это соответствует времени распиловки пиловочника, получения и хранения опилок с ноября по апрель, с мая по октябрь, с июля по декабрь соответственно. Опилки хранились в кучах высотой 1,5 м, диаметром 2 м. Кучи ничем не закрывались, подвергались воздействию осадков. Из смеси формировались образцы кубической формы (по 12 образцов) с размерами 5×5×5 см, выдерживались 28 суток при комнатной температуре и подвергались разрушению на испытательной машине — прессе. Для каждого образца фиксировалось значение прочности, для партии из 12 образцов рассчитывалось среднее значение прочности. Данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Показатель прочности образцов

Время выдержки опилок, суток	Предел прочности, МПа, при сжатии		
	Минимальная температура	Средняя температура	Высокая температура
60	1,08	1,32	1,7
120	1,12	1,78	1,99
180	1,53	2,1	2,4

Из данных таблицы видно, что при увеличении сроков хранения древесных опилок растет прочность опилкобетона, изготовленного на основе этого сырья. При хранении с ноября по апрель, т. е. в условиях отрицательных температур, прочность образцов остается на минимальном уровне, поскольку при отрицательных температурах происходит замедление или остановка процессов в жидких водных средах. В общем случае, чем больше срок выдержки опилок на площадке хранения, тем выше прочность образца опилкобетона. Зависимость эта нелинейна. Срок хранения до 120 суток оказывает меньшее влияние, чем срок хранения от 120 до 180 суток. Температура хранения влияет аналогично. Снижение содержания водорастворимых веществ и, соответственно, потери влаги измельченного древесного сырья можно оценить косвенным способом — по оценке теплотворной способности щепы. При хранении измельченной древесины на складах кучевого хранения, расположенных на открытом воздухе, имеет место ряд процессов. Это естественная сушка и повышение

теплотворной способности и одновременно разложение и деструкция с потерей массы [11].

Снижение плотности измельченного сырья обусловлено процессами гниения, образования легко испаряемой уксусной кислоты, снижением содержания смол [12]. Уменьшение объемного веса за счет испарения легколетучих фракций и частичной деструкции потенциально будет приводить к увеличению прочности древесно-минеральных композитов, изготовленных из этой древесины. Для оценки необходимого времени подготовки сырья и компонентов важно иметь возможность прогноза показателей древесно-минерального композита. Ранее в работе [13] для этого успешно применялись методы нейронных сетей.

Для дальнейшей работы определим лингвистические переменные, функции принадлежности и базу нечетких правил. Для прикладной задачи, связанной с определением прочностных показателей древесно-минерального композита в зависимости от времени выдержки древесного наполнителя в кучах открытого хранения, воспользуемся методикой, изложенной в работе [10].

Мы будем использовать следующие лингвистические переменные: «time» — срок выдержки опилок на площадке хранения, «temperature» — температура хранения, «MPa» — прочность образца. Базовое термножество каждой из этих переменных будет содержать три значения: {min, mid, max}, что соответствует минимальной, средней и максимальной величине данной переменной. Таким образом, для каждой переменной необходимо определить три функции принадлежности.

Натурный эксперимент показал, что предел прочности образцов находится в диапазоне от 1,08 до 2,4 МПа. Время выдержки составляет от 60 до 180 суток. Для показателей температуры примем величины -15; 0; +15 °С, что соответствует нечетким значениям «низкая», «средняя» и «высокая» температура, соответственно. Таким образом, функции принадлежности будут иметь следующие области определения: [60, 180] для переменной «time», [-15; +15] для переменной «temperature» и [1,08; 2,4] для переменной «MPa».

Для средних значений (mid) лингвистических переменных будем использовать треугольный тип функций принадлежности, а для минимальных (min) и максимальных (max) — функции принадлежности сигмоидного типа. Сигмоидная функция позволит получить более сглаженную результирующую зависимость [14; 15].

На основе данных табл. 1 сформулируем нечеткие правила зависимости выходной переменной «MPa» от входных переменных «time» и «temperature». В табл. 2 показаны правила нечеткого вывода.

Таблица 2. База правил нечеткого вывода

Значение переменной «time»	Значение переменной «MPa» при изменении переменной «temperature»		
	Min	Mid	Max
Min	Min	Mid	Max
Mid	Min	Mid	Max
Max	Mid	Max	Max

Для построения системы нечеткого вывода используем вывод Мамдани, реализованный в приложении *Fuzzy Logic Toolbox* прикладного пакета *Matlab*. Система нечеткой логики *Fuzzy Logic Toolbox* — это программа прикладного назначения, работающая на основе теории размытых или нечетких множеств. Программа генерирует системы нечеткого ввода различного назначения. Пакет *Fuzzy Logic Toolbox* содержит в своем составе систему нечеткого вывода в виде редактора *FIS Editor*, оператора *Membership Function Editor*, предназначенного для присвоения функций принадлежности. Также имеются редактор и система просмотра правил *Rule Editor*, *Rule Viewer*. Для визуализации и графического представления результатов имеется система просмотра графиков *Surface Viewer*.

Вид окна *FIS Editor* для рассматриваемой системы нечеткого вывода представлен на рис. 1.

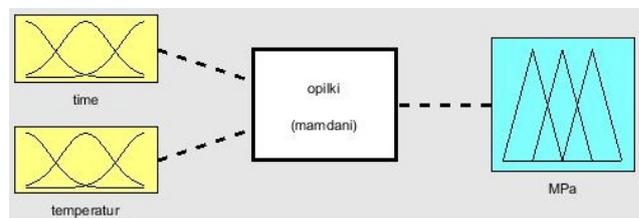


Рис. 1. Схема нечеткого вывода в среде *Matlab*

Вид функций принадлежности в окне редактора *Membership Function Editor* представлен на рис. 2.

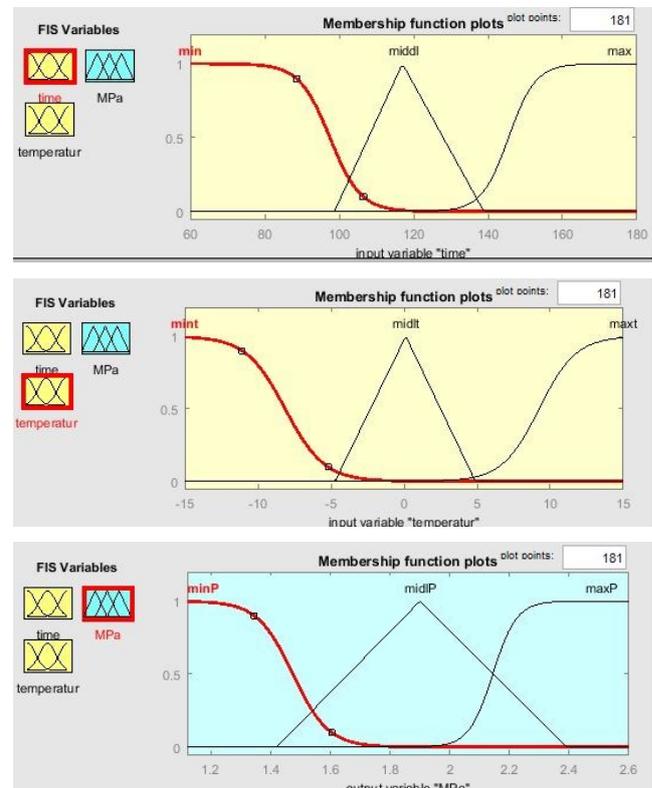
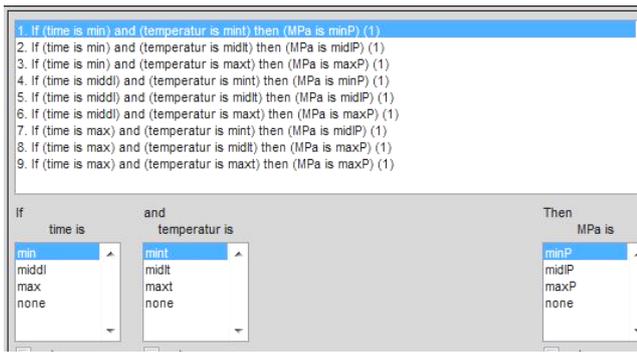
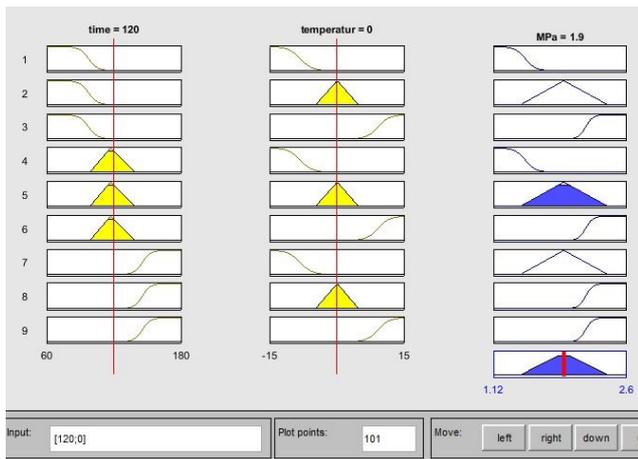


Рис. 2. Окно редактора функций принадлежности: входные переменные «time» и «temperature», выходная переменная «MPa»

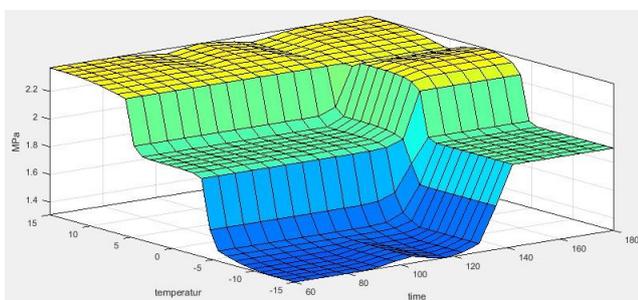
Набор нечетких правил в окне редактора *Rule Editor* представлен на рис. 3.

Рис. 3. Окно редактора правил *Rule Editor*

Результат применения нечетких правил в окне просмотра *Rule Viewer* представлен на рис. 4. В левой части находятся функции принадлежности входных переменных. Две красные вертикальные черты отмечают четкие значения входов «*time*» и «*temperatur*». Величина функции выходной переменной показана в окне справа, также там имеется пояснение механизма принятия решения, само результирующее значение. Для рис. 4 время хранения 120 дней, температура 0 градусов, прогнозируемая прочность композита 1,9 МПа.

Рис. 4. Окно просмотра правил *Rule Viewer*

Функция зависимости выходной переменной «*MPa*» от переменных «*time*» и «*temperatur*» показана на рис. 5 в виде поверхности отклика.

Рис. 5. Графическое представление зависимости выходной переменной «*MPa*» от переменных «*time*» и «*temperatur*»

Предлагаемая модель, построенная на основе нечеткого вывода, учитывает основные технологические параметры — время и температуру выдержки древесного наполнителя. Для сравнения результатов модели-

рования с экспериментальными данными проведем расчет показателя прочности и процентного отклонения от экспериментальных данных. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Показатель прочности образцов

Время выдержки опилок, суток	Предел прочности, МПа, — данные модели нечеткой логики (отклонение от экспериментальных данных, выраженное в %)		
	Минимальная температура	Средняя температура	Высокая температура
60	1,26 (16 %)	1,84 (39 %)	2,17 (27 %)
120	1,37 (22 %)	1,9 (7 %)	2,37 (19 %)
180	1,84 (20 %)	2,3 (9 %)	2,49 (3 %)

Полученные в результате нечеткого вывода величины предела прочности древесно-минерального композита имеют величину отклонений от экспериментальных данных в размере от 3 до 39 %. Для условий функционирования модели нечеткого вывода полученную точность можно считать допустимой. Модель нечеткого вывода может применяться для прогноза величины прочности древесно-минерального композита в зависимости от времени хранения древесных компонентов и температуры.

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Физико-механические показатели древесно-минеральных композитов зависят как от физических показателей компонентов, связанных с их механической обработкой, так и от комплекса химических свойств минеральных и органических компонентов, причем для последних эти свойства не являются константой, а постоянно изменяются, например, в условиях длительного кучевого хранения на открытых складах.

2. Современные математические методы и компьютерные средства позволяют эффективно моделировать процессы, связанные с производством древесно-минеральных композитов. Метод нечетких множеств — один из инструментов совершенствования технологии.

3. Сформулированная база нечетких правил позволяет отвечать на вопрос о прочности с точностью от 3 до 39 %, для повышения показателей точности имеет смысл прибегнуть к решению этой задачи с помощью нечетких нейронных сетей ИИ с повышенной точностью предсказания.

Заключение. Переработка низкокачественной древесины и древесных отходов в рамках тренда комплексного использования древесного сырья — серьезная задача, которую следует решать в том числе путем организации производства конструкционно-теплоизоляционных строительных материалов на основе древесно-минеральных композитов. Методы нечеткой логики в сочетании с возможностями вычислительной техники позволяют прогнозировать прочностные показатели древесно-минерального композита, изготовленного из древесных опилок различного срока хранения. Такой прогноз позволяет снизить расходы минерализаторов, ингибиторов и других добавок, введение которых необходимо для снижения негативного влияния гемицеллюлоз и водорастворимых веществ.

Литература

1. Иссинский П.А. Влияние нагревания древесины в замкнутом пространстве на изменение ее химического состава. Отчет 1. ЦНИЛХИ, 1934. 98 с.
2. Богомолов Б.Д. Химия древесины и основы химии высокомолекулярных соединений. М.: Лесная пром-сть, 1973. 400 с.
3. Наназашвили И.Х. Строительные материалы из древесно-цементных композиций. Л.: Стройиздат, 1990. 416 с.
4. Пряничникова А.В., Долматов С.Н., Стрижнев В.П., Шаронова М.З. Влияние древесных сахаров на прочностные характеристики древесно-цементных композиций // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сб. материалов Всерос. науч.-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (25-26 апр. 2019 г.). Красноярск, 2019. С. 115-117.
5. Пошарников Ф.В., Филчихина М.В. Исследование закономерностей гидратации цемента в древесно-композиционных материалах // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 2. С. 21.
6. ГОСТ 19222-84. Арболит и изделия из него. Общие технические требования. Введ. 01.01.1985 // Доступ из справ.-правовой системы «Кодекс».
7. Гринек А.В., Рыбина А.В. Нечеткая модель вывода значения скорости резания на основе данных имитационного моделирования // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2016. Т. 20, № 12 (119). С. 109-118.
8. Побединский В.В., Асин К.П., Побединский Е.В. Нечеткое моделирование динамических нагрузок на инструмент роторного окорочного станка // Аграрный науч. журнал. 2014. № 12. С. 58-61.
9. Бахтин А.М., Трошин Г.Е., Побединский В.В. Нечеткое моделирование процесса диагностирования воспаления верхних мочевых путей // Уральский медицинский журнал. 2015. № 1. С. 43-47.
10. Побединский В.В., Сиваков В.П. Нечеткое моделирование процесса выгрузки технологической щепы // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2018. Т. 22, № 2. С. 75-83.
11. Леонов Е.А., Клоков Д.В., Гарабажу А.А., Духовник А.А. Влияние сроков хранения древесного сырья и топливной щепы на их теплотворную способность // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 2 (234). С. 186-191.
12. Кулак М.И., Федоренчик А.С., Леонов Е.А. Прогнозирование хранения запасов топлива в условиях лесозаготовительных терминалов // Наука и инновации. 2012. № 7. С. 69-72.
13. Долматов С.Н., Бабкина Т.С. Применение нейронных сетей для прогнозирования прочности древесно-минерального композита // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 1 (57). С. 87-94.
14. Дьяконов В.П., Круглов В.В. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. М.: Солон-Пресс, 2006. 456 с.
15. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ Петербург, 2005. 736 с.

References

1. Issinskij P.A. The effect of heating wood in a confined space on changes in its chemical composition. Otchet 1. CNILHI, 1934. 98 p.
2. Bogomolov B.D. Chemistry of wood and the basics of chemistry of high molecular weight compounds. M.: Lesnaya prom-st', 1973. 400 p.
3. Nanazashvili I.H. Building materials made of wood-cement compositions. L.: Strojizdat, 1990. 416 p.
4. Pryanichnikova A.V., Dolmatov S.N., Strizhnev V.P., SHaronova M.Z. The effect of wood sugars on the strength characteristics of wood-cement compositions // Molodye uchenye v reshenii aktual'nyh problem nauki: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh (25-26 apr. 2019 g.). Krasnoyarsk, 2019. P. 115-117.
5. Posharnikov F.V., Filichkina M.V. Investigation of the regularities of cement hydration in wood-composite materials // Modern problems of science and education. 2011. № 2. P. 21.
6. GOST 19222-84. Arbolite and products made from it. General technical requirements. Vved. 01.01.1985 // Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Kodeks».
7. Grinek A.V., Rybina A.V. A fuzzy model for the output of the cutting speed value based on simulation data // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2016. V. 20, № 12 (119). P. 109-118.
8. Pobedinskij V.V., Asin K.P., Pobedinskij E.V. Fuzzy modeling of dynamic loads on the tool of a rotary debarking machine // Agrarian scientific journal. 2014. № 12. P. 58-61.
9. Bahtin A.M., Troshin G.E., Pobedinskij V.V. Fuzzy modeling of the process of diagnosing inflammation of the upper urinary tract // Ural medical journal. 2015. № 1. P. 43-47.
10. Pobedinskij V.V., Sivakov V.P. Fuzzy modeling of the process of unloading technological chips // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2018. V. 22, № 2. P. 75-83.
11. Leonov E.A., Klovok D.V., Garabazhiu A.A., Duhovnik A.A. The effect of the shelf life of wood raw materials and fuel chips on their calorific value // Trudy BGTU. Ser. 1. Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых resursov. 2020. № 2 (234). P. 186-191.
12. Kulak M.I., Fedorenchik A.S., Leonov E.A. Forecasting the storage of fuel reserves in the conditions of forest energy terminals // Nauka i innovacii. 2012. № 7. P. 69-72.
13. Dolmatov S.N., Babkina T.S. The use of neural networks to predict the strength of a wood-mineral composite // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 1 (57). P. 87-94.
14. D'yakonov V.P., Kruglov V.V. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Artificial intelligence and Bioinformatics tools. M.: Solon-Press, 2006. 456 p.
15. Leonenkov A.V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH environments. SPb.: BHV Peterburr, 2005. 736 p.