

Цифровая оптимизация свойств композиционного связующего

Е.Ю. Боброва¹, А.Д. Жуков¹, С.О. Артеменко¹, П.К. Гудков²

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

²Финансовый университет при правительстве Российской Федерации, г. Москва

Аннотация: Натурный эксперимент в технологии строительных материалов характеризуется высокой материалоемкостью и временем для исследований, а также большим числом варьируемых факторов. Кроме того, всегда остаётся открытым вопрос о достоверности получаемых результатов и способов проверки этой достоверности. В связи с этим всегда является актуальным использование статистических методов организации эксперимента и цифровых методов анализа его результатов. Разработанный в НИУ МГСУ метод базируется на «классических методах» статистического планирования и обработки результатов эксперимента с применением методов алгебраического или матричного анализа нелинейных функций нескольких переменных.

Целью работы является анализ априорной информации и проведение, с привлечением цифровых и статистических методов экспериментальных исследований по модификации термоотверждаемого эпоксидного связующего за счет введения пластификатора и латентного компонента.

В результате получены цифровые модели, связывающие основные свойства с изменением варьируемых факторов и разработана аналитическая методика прогнозирования свойств изделий, а также подбора их состава. Получено и исследовано композиционное эпоксидное связующее следующего состава: содержание латентного компонента 6,0%; содержание пластификатора 3,0%. Температура поликонденсации связующего: 150-154 °С. После отверждения связующего прочность адгезионного контакта с поверхностью стекла 58,4 МПа, предел прочности связующего при растяжении 77,4 МПа и адгезионная прочность контакта после климатических испытаний 29,1 МПа.

Ключевые слова: минераловолокнистый материал, теплоизоляционный материал, цифровая модель, синтетическое связующее, латентный компонент, термоотверждение связующего, уравнение регрессии, аналитическая оптимизация, физико-механическое свойство, введение пластификатора.

Введение

Натурный эксперимент является в технологии строительных материалов характеризуется высокой материалоемкостью и временем для исследований, а также большим числом варьируемых факторов. Кроме все всегда остаётся открытым вопрос о достоверности получаемых результатов и способов проверки этой достоверности. В связи с этим всегда является актуальным использование статистических методов организации эксперимента и цифровых методов анализа его результатов. Разработанный в

НИУ МГСУ метод базируется на «классических методах» статистического планирования и обработки результатов эксперимента с применением методов алгебраического или матричного анализа нелинейных функций нескольких переменных [1, 2].

Современными тенденциями развития строительной отрасли является ориентация на энергоэффективность и на создание комфортных или технологически приемлемых условий в изолируемых помещениях. Энергоэффективность предполагает оправданное снижение потерь тепла при производстве материалов и их эксплуатации, а создание комфортных условий — формирование оптимального температурно-влажностного микроклимата в помещениях, а также акустического и санитарного комфорта. В этом отношении перспективным является использование эффективных изоляционных материалов, в том числе - особо легких теплозвукоизоляционных материалов и изделий на их основе. Практика показывает, что наименьшую плотность и теплопроводность и водопоглощение, а также стойкость к воздействию воды показывают вспененные пластмассы. При этом, такие материалы в своем большинстве являются горючими, что значительно ограничивает возможности их применения [3].

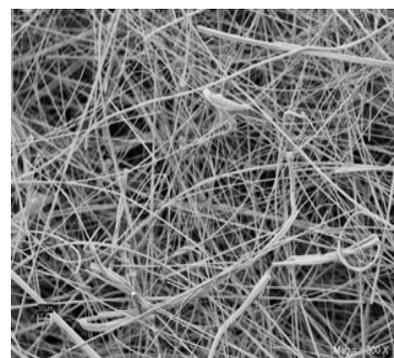
Стоит отметить, что продолжают исследования в области разработки и создания теплоизоляционных материалов из растительного сырья и возобновляемых ресурсов. Материалы с применением экологически чистых клеевых смол и матриц, таких, как полиуретан, произведенный из касторового масла, либо с применением биологического казеинового клея, экологически безопасны и имеют надежные технические характеристики [4]. Отдельно можно выделить плитные материалы на основе продукции деревообрабатывающих производств, одним из таких является - «Гофрошпон». Его различные технологические варианты производства

позволяют улучшить тепловые характеристики и достичь приемлемых показателей коэффициента теплопроводности [5].

Теплозвукоизоляционные материалы на минеральной основе в своей массе относятся к группе негорючих, что повышает привлекательность их применения. Применяют две группы материалов: ячеистой структуры, и изделия структура которых формируется за счет переплетения минеральных волокон, как показано на рис. 1. К материалам ячеистой структуры относят пеностекло, ячеистое стекло холодного отверждения, пеногипс, особо легкий ячеистый бетон. К минераловолокнистым материалам относят изделия на основе базальтового и стеклянного волокна, а также минеральной или каменной ваты. Структура материалов, имеющих волокнистую (межволоконную) пористость, формируется на стадии изготовления при формировании минераловатного ковра, а также за счет термоотверждения связующего, вводимого в процессе формирования ковра [6, 7].



а



б

Рис. 1. – Виды пористости особолегких материалов: а – ячеистая (пенобетон);
б – волокнистая (каменная вата)

Синтетическое связующее, вводимое в камеру волоконосаждения (формирования минераловатного ковра) методом распыления, равномерно распределяется в объеме материала и за счет сил поверхностного натяжения

концентрируется в областях контакта между волокнами. Далее ковер поступает в камеру термообработки, где связующее отверждается по термореактивному механизму.

В технологии минераловатных изделий в основном используют два вида связующих веществ: нейтрализованное аммиачной водой фенольное связующее и связующее на основе феноло-формальдегидных смол. Фасадные теплоизоляционные изделия на этих связующих показывают прочностные характеристики, соответствующие нормативным и относительно высокую эксплуатационную стойкость. При этом, имеется ряд особенностей. Во-первых, компоненты этих связующих в неотвержденном состоянии являются токсичными веществами. Во-вторых, при нарушении технологического регламента возможно неполное отверждение связующего в минераловатном ковре, что делает изделия опасными к применению. Отметим также, что пары фенола, помимо резкого запаха, обладают кумулятивным эффектом, то есть накапливаются в организме человека. В-третьих, температура отверждения связующих этой группы превышает 270 °С, что с одной стороны приводит к энергетическим затратам, а с другой — осложняет равномерное протекание реакции поликонденсации в изделии [8, 9].

В современных химических технологиях исследованы большие группы синтетических веществ, которые могут рассматриваться как связующее для минераловолокнистых изделий. Проводятся исследования возможностей применения связующих различных классов: полиэфирных, эпоксивинилэфирных, эпоксидных, фенолформальдегидных, кремнийорганических, полиамидных, полициануратовых, карбамидных и др. В большинстве случаев применимость связующего предполагает введение синтетических или минеральных модифицирующих добавок, ориентированных, в первую очередь, на снижение температуры отверждения,

повышение эластичности отвержденного контакта, а также улучшения адгезии связующего к волокну [10, 11]. Использование композиционных связующих предполагает не только улучшения свойств и эксплуатационной стойкости изделий на их основе, но и снижение энергетических затрат на изготовление связующего и его отверждение в материале.

Применительно к связующим на основе эпоксидных соединений наиболее перспективным является применение модификаторов, повышающих адгезию и эластичность омоноличивания волокон, а также использование латентных синтетических компонентов, позволяющих, в том числе снизить температуру поликонденсации связующего. По факту совместимости с эпоксидными соединениями может перспективным является применение трикрезилфосфата или олеиновой кислоты. Добавление латентного (скрытого) отвердителя (диэтиламинборана) в массу эпоксиды позволяет варьировать интервал температуры и времени тепловой обработки, снижая затраты на таковую.

Целью работы является анализ априорной информации и проведение, с привлечением цифровых и статистических методов экспериментальных исследований по модификации упрочнения термоотверждаемого эпоксидного связующего за счет введения пластификатора и латентного компонента.

Условия проведения эксперимента

В эксперименте, в качестве оцениваемых результатов были приняты прочность при сжатии композиционного связующего (U_1) и его адгезия (U_2) к стеклянной поверхности (как аналогу минерального волокна, имеющего аморфную структуру); так же оценивалось изменение прочности адгезии в результате климатического воздействия (U_3). В качестве параметра оптимизации был принят U_2 .

Эксперимент проводился в два этапа с использованием разработанной методики. На первом этапе изучалось линейное влияние всех значимых факторов на параметр оптимизации. В итоге было выбрано 3 наиболее значимых: содержание латентного компонента в композиционном связующем (X_1), содержание пластификатора в композиционном связующем (X_2), температура отверждения композиционного связующего (X_3). Влияние этих трех факторов исследовалось в процессе реализации второго этапа, условия проведения которого представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Условия проведения эксперимента второго этапа

Наименование фактора	Символ, X_i	Среднее значение фактора, \bar{X}_i	Интервал варьирования, ΔX_i	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Содержание латентного компонента, %	X_1	3	1	2	4
Содержание пластификатора, %	X_2	2	1	1	3
Температура отверждения, °C	X_3	120	40	80	160

Адгезионные соединения между синтетическим вяжущим и материалом основы (пластинами стекла), их механические и эксплуатационные свойства оценивались по методикам ГОСТ 28780-90; ГОСТ 14759; ГОСТ 9.712. «Методы испытаний клеевых соединений»; ГОСТ Р 55402 и ГОСТ Р 55403. Прочность адгезионных соединений оценивается по способам приложения нагрузки и по испытательным поверхностям. Прочности при сдвиге и растяжении определяли на машине INSTRON 3382 Эксплуатационную стойкость вяжущего (изменение адгезии к стеклянной подложке) определяли по результату климатических воздействий в течение

60 циклов попеременного замораживания и оттаивания в интервале температур от минус 30 до +60 °С.

Эксперимент и результаты

Проведение активного эксперимента осуществлялось по плану полного факторного эксперимента для получения нелинейных полиномов (уравнений регрессии). Обработка результатов эксперимента проводилась в программе Statistika. Проверка адекватности моделей осуществлялась по критерию Фишера [1, 2]. Цифровая обработка позволила получить уравнения регрессии (алгебраические полиномы или цифровые модели) следующего вида:

Предел прочности связующего при растяжении (доверительный интервал $\Delta b_1 = 2,2$ МПа):

$$Y_1 = 56 + 7X_1 + 8X_2 + 9X_3 + 4X_1X_2 - 3X_3^2 \quad (1)$$

Адгезионная прочность после отверждения (доверительный интервал $\Delta b_1 = 3,7$ МПа):

$$Y_2 = 32 + 8X_1 + 13X_2 + 10X_3 + 5X_1X_2 - 6X_3^2 \quad (2)$$

Адгезионная прочность после климатических испытаний (доверительный интервал $\Delta b_1 = 0,6$ МПа):

$$Y_3 = 21 + 3X_1 + 4X_2 + 2X_3 + 1X_1X_2 - 1X_3^2 \quad (3)$$

Анализ коэффициентов уравнений регрессии позволил установить, что влияние температуры тепловой обработки неоднозначно, что следует из анализа коэффициентов при X_3 и X_3^2 (со знаком минус). Это нелинейное влияние позволяет использовать методику аналитической оптимизации [1, 2]. Согласно этой методике уравнения регрессии (1-3) рассматриваются как алгебраические полиномы: функции трех переменных, к которым применимы методы математического анализа.

Определяем экстремум функции (2) по X_3 , приравниваем его 0 и получаем значение оптимальной температуры термообработки:

$$\frac{\partial Y_2}{\partial X_3} = 10 - 12X_3 = 0 \rightarrow X_3 = \frac{10}{12} = 0.83 \quad (4)$$

Подставляем полученное оптимальное значение температуры отверждения (в кодированном виде, подставляем его в уравнения (1-3) и получаем оптимизированные функции:

Предел прочности связующего при растяжении (оптимизированная функция):

$$Y_1 = 61 + 7X_1 + 8X_2 + 4X_1X_2 \quad (5)$$

Адгезионная прочность после отверждения (оптимизированная функция):

$$Y_2 = 36 + 8X_1 + 13X_2 + 5X_1X_2 \quad (6)$$

Адгезионная прочность после климатических испытаний (оптимизированная функция):

$$Y_3 = 22 + 3X_1 + 4X_2 + 1X_1X_2 \quad (7)$$

Определяем с помощью условий табл. 1 натуральное значение оптимальной температуры термообработки: $t = 120 + 40 \times 0,83 = 152$ °С или с учетом статистической погрешности 150-154 °С.

Следующим этапом является проверка полученных оптимизационных решений и их сопоставимость с реальными результатами, получаемыми в дополнительных сериях активного эксперимента. Проверка осуществляется по параметру оптимизации (Y_2): адгезии отвержденного связующего к основанию.

Наилучшие результаты получены для состава №1, который и является оптимальным для проектируемого композиционного вяжущего: содержание латентного компонента 6,0%; содержание пластификатора 3,0% при оптимальной температуре тепловой обработки 150-154 °С. этому составу соответствуют прочность адгезии после отверждения связующего 58,4 МПа и, определенные расчетным путем (с помощью полиномов 5 и 7) предел

прочности связующего при растяжении 77,4 МПа и адгезионная прочность после климатических испытаний 29,1 МПа.

Условия проведения эксперимента и его результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Определение оптимальных значений варьируемых факторов (при оптимальной температуре термообработки 150-154 °С)

№ ОП ЫТ ОВ	Варьируемы факторы				Прочность адгезии, МПа		Расхо ждени е, %
	Содержан ие латентного компонент а, %	X_1	Содержа ние пластиф икатора, %	X_2	Расчетная	Эксперим ентальная	
1	2	3	5	6	7	8	9
1	6,0	+0,9	3,0	+0,9	61,5	58,4	5,0
2	6,0	+0,9	2,0	0	43,6	45,1	3,3
3	3,5	+0,5	2,0	0	39,7	38,2	3,7
4	2,5	=0,5	2,0	0	29,4	31,2	5,8
5	2,0	=0,9	1,0	=0,9	20,4	22,6	9,7
6	2,0	=0,9	1,0	+0,9	36,5	37,9	5,3
7	4,0	0	2,0	0	36,0	35,2	2,2
8	3,5	0	2,0	+0,5	42,1	43,3	2,8
9	2,5	0	2,0	=0,5	29,6	31,8	6,9
10	4,0	0	1,0	=0,9	48,7	51,4	5,3

Направлением дальнейших исследований является отработка технологических приёмов приготовления связующего, его введения в минераловатный ковер и отверждения.

Заключение

Применение цифровых технологий при формировании планов эксперимента, обработки его результатов и оптимизации полученных

моделей позволяет значительно снизить материало- и трудоемкость исследований, оптимизировать их время, а также создает возможности многоуровневой проверки адекватности полученных результатов.

Реализация эксперимента позволила получить композиционное вяжущее следующего состава: содержание латентного компонента 6,0%; содержание пластификатора 3,0%. Оптимизирована температура тепловой обработки: 150-154 °С. Этому составу соответствуют прочность адгезии после отверждения связующего 58,4 МПа и, определенные аналитическим путем предел прочности связующего при растяжении 77,4 МПа и адгезионная прочность после климатических испытаний 29,1 МПа.

Литература

1. Ter-Zakaryan K. A., Zhukov A. D., Bobrova E. Yu., Bessonov I. V., Mednikova E. A. Foam Polymers in Multifunctional Insulating Coatings // *Polymers* 2021, P. 13(21), 3698
2. Ter-Zakaryan, K.A.; Zhukov, A.D.; Bessonov, I.V.; Bobrova, E.Y, Pshunov, T.A.; Dotkulov, K.T. Modified Polyethylene Foam for Critical Environments // *Polymers* 2022, P. 14, 4688.
3. Каддо М.Б., Ефимов Б.А. Энергетическая эффективность фасадных систем изоляции // *Инженерный вестник Дона*, 2024, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9582
4. Содомон М., Степина И.В., Воронина А.Е., Рагимова С.Р. Инновационные подходы к использованию экологически безопасных полимерных связующих в производстве теплоизоляционных материалов на основе растительного сырья // *Инженерный вестник Дона*, 2024, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/issue/204
5. Галактионов О.Н., Кузьменков А.А., Суханов Ю.В., Карпов М.В., Потахин А.Г. // *Исследование теплопроводности перспективного*

строительного материала «Гофрошпон» // Инженерный вестник Дона, 2025, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/issue/205

6. Меркулова Ю.И., Мухаметов Р.Р., Долгова Е.В., Ахмадиева К.Р. Полициануратное связующее для получения композитов пропиткой под давлением // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №11 (47). Ст. 05. URL: viam-works.ru (дата обращения: 15.12.2024).

7. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Терморреактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) //Авиационные материалы и технологии. 2019. №3. С.48-56.

8. Дроздюк Т.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Верма Рама Шанкер. Минераловатный композит с использованием сапонитсодержащих отходов горнодобывающей промышленности // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. №3. С. 21-27

9. Дроздюк, Т.А., Айзенштадт А.М., Королев Е.В. Высокотемпературная модификация сапонитсодержащего материала // Строительные материалы. 2021. № 11. С. 30-35.

10. Мустафа Л.М., Исмаилов М.Б., Ермаханова А.М., Санин А.Ф. Исследование влияния пластификаторов и термопластов на механические свойства эпоксидной смолы и углепластика (Обзор) // Комплексное использование минерального сырья (Complex Use of Mineral Resources). – 2019. №4 (311). С. 48-56.

11. Artemenko Savely Olegovich, Bobrova Ekaterina Yuryevna, Zhukov Aleksey Dmitrievich Studies of the properties and structure of mineral wool energy-efficient products // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. Beijing, China, Scientific publishing house Infinity, 2024. pp. 152-157.

References

1. Ter-Zakaryan K. A., Zhukov A. D., Bobrova E. Yu., Bessonov I. V., Mednikova E. A. *Polymers*. 2021, P. 13(21), 3698.
2. Ter-Zakaryan, K.A.; Zhukov, A.D.; Bessonov, I.V.; Bobrova, E.Y.; Pshunov, T.A.; Dotkulov, K.T. *Polymers* 2022, P. 14, 4688.
3. Kaddo M.B., Efimov B.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2024, № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9582
4. Solomon M. Stepina.V., Voronina A.E., Rakhimova S.R. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2024, No. 12 URL: ivdon.ru/ru/magazine/issue/204
5. Galaktionova.N., Kuzmenkov A.A., Sukhanov Yu.V., Karpov M.V., Potakhin A.G. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2025, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/issue/205
6. Merkulova YU.I., Mukhametov R.R., Dolgova E.V., Akhmadiyeva K.R. *Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. zhurn.* 2016. №11 (47). P. 05. URL: viam-works.ru (data obrashcheniya: 15.12.2024).
7. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. 2019. №3. pp. 48-56.
8. T.A. Drozdyuk, A.M. Ayzenshtadt, M.A. Frolova, Rama Shanker Verma. *Stroitel'nyye materialy i izdeliya*. 2020. T. 3. №3. pp. 21-27.
9. Drozdyuk, T.A., Ayzenshtadt A.M., Korolev E.V. *Stroitel'nyye materialy*. 2021. № 11. pp. 30-35.
10. Mustafa L.M., Ismailov M.B., Yermakhanova A.M., Sanin A.F. *Kompleksnoye ispol'zovaniye mineral'nogo syr'ya (Complex Use of Mineral Resources)*. 2019. №4 (311). pp. 48-56.
11. Artemenko Savely Olegovich, Bobrova Ekaterina Yuryevna, Zhukov Aleksey Dmitrievich. *Scientific research of the SCO countries: synergy and integration*. Beijing, China: Scientific publishing house Infinity, 2024. pp. 152-157.

Дата поступления: 19.11.2024

Дата публикации: 9.01.2025