Влияние концентраций нанонаполнителей на механические характеристики полиэтиленовых труб: результаты полного факторного планирования эксперимента

Воронов Александр Сергеевич
аспирант, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, 1142220725@rudn.ru

Настоящая статья посвящена экспериментальному изучению влияния концентраций нанонаполнителей на механические характеристики полиэтиленовых труб с использованием полного факторного эксперимента 2^4. Основная цель работы - разработка и апробация методики целенаправленной оптимизации механических свойств наноструктурированных полиэтиленовых труб (ПНД PE100) с использованием полного факторного эксперимента 2^4 и построения регрессионных моделей зависимости свойств от концентраций четырёх нанонаполнителей.
Применение полного факторного эксперимента 2^4 позволило систематически выявить линейные и взаимодействующие эффекты нанонаполнителей и предложить сбалансированную рецептуру, обеспечивающую значительное повышение прочности (+15-20 %) при приемлемом уровне пластичности. Разработанный подход существенно сокращает объём экспериментальной работы и может быть использован для оптимизации наноструктурированных полимерных композиций в трубной промышленности.
Ключевые слова: полиэтиленовые трубы, наномодификация, полный факторный эксперимент, регрессионные модели, углеродные нанотрубки, графен, механические свойства, оптимизация рецептуры.

Введение

Обеспечение качества и надёжности полиэтиленовых труб (ПНД, HDPE) на стадиях производства, монтажа и эксплуатации остаётся критической задачей для трубопроводных систем водоснабжения, канализации и газоснабжения, где преждевременные отказы приводят к значительным экономическим потерям, экологическим рискам и угрозам безопасности [1-3]. Традиционные методы контроля (механические испытания на растяжение и сжатие по ГОСТ 11262 и ГОСТ 4651, гидростатические тесты по ISO 9080, ускоренное климатическое старение по ГОСТ 9.401) являются разрушающими или полуразрушающими, требуют больших временных (тысячи часов) и материальных затрат, а также не позволяют оперативно выявлять микроструктурные дефекты и неоднородности на ранних стадиях деградации [4, 5]. В условиях ужесточения требований к сроку службы (≥50-100 лет) и эксплуатации в экстремальных климатических зонах эти методы становятся недостаточно эффективными [6].

Развитие неразрушающих методов контроля (НДК) включает ультразвуковые техники (фазированные решётки, TOFD - time-of-flight diffraction), акустические, инфракрасные (термография) и рентгеновские подходы, которые успешно применяются для выявления дефектов сварных швов, трещин и неоднородностей в полиэтиленовых трубах [7-10]. В частности, TOFD и фазированные ультразвуковые массивы демонстрируют высокую чувствительность к внутренним дефектам в PE-трубах, включая зоны медленного роста трещин (SCG) и дефекты стыковых сварных соединений [11, 12]. Однако эти методы имеют ограничения: низкая чувствительность к ранним стадиям структурной деградации в наноструктурированных композитах, необходимость сложного оборудования, квалифицированного персонала и длительной обработки сигналов, а также трудности с количественной оценкой микроструктурной неоднородности (5-12 %) и прогнозированием эксплуатационных свойств без разрушения образца [13, 14].

В последние годы активно развиваются междисциплинарные подходы, сочетающие различные математические методы [15-17]. Внимание исследователей и производителей всё чаще привлекают наноструктурированные композиты - введение малых количеств (0,3-5,0 мас. %) наночастиц (углеродные нанотрубки CNT, графен, оксиды TiO_2 и SiO_2 и др.). Такие добавки способны существенно улучшать барьерные свойства, сопротивление ползучести и SCG, термическую и химическую стабильность, а также механические характеристики (прочность, модуль упругости) без критического снижения пластичности [18-20]. Несмотря на значительное количество публикаций по влиянию отдельных нанонаполнителей на полимерные матрицы, систематические исследования комплексного воздействия комбинаций CNT, графена, TiO_2 и SiO_2 на свойства трубных марок ПНД PE100 остаются ограниченными. Отсутствуют также надёжные математические модели, позволяющие прогнозировать свойства композиции при варьировании концентраций и выявлять оптимальные рецептуры с минимальным количеством экспериментов. [21-23].

Однако в литературе практически отсутствуют систематические исследования влияния модификаторов для экспресс-оценки и прогнозирования свойств наноструктурированных ПНД-труб с погрешностью 4-9 %, а также специализированное программное обеспечение для автоматизированного расчёта этих характеристик на основе изображений микроструктуры [24, 25].

Цель исследования - разработать и апробировать методику оптимизации состава наноструктурированных ПНД-труб на основе полного факторного планирования эксперимента, выявить вклад каждого нанонаполнителя и их взаимодействий в ключевые механические свойства, а также предложить рациональную рецептуру для промышленного применения.

Материалы и методы

В рамках исследования был осуществлён подбор материала - труб из полиэтилена высокой плотности (ПНД марки PE100), обладающих характеристиками, соответствующими требованиям действующих стандартов отрасли: плотность составляет 947 кг/м³, водопоглощение за 72 часа не превышает 0,04 %, значение микротвёрдости по Виккерсу достигает 5,07 HV.

Оптимально подобранная комбинированная рецептура (суммарное содержание модифицирующих добавок ≈ 7 мас. %) позволяет достичь удачного сочетания повышенной прочности, увеличенного модуля упругости и улучшенной устойчивости к климатическим факторам при сохранении приемлемого уровня пластичности материала.

При испытаниях на механические свойства образцы размещали на опорной платформе оснастки универсальной испытательной машины и подвергали сжатию до 30 % от исходной высоты. Скорость перемещения траверсы поддерживалась постоянной - 5 мм/мин. В ходе испытаний фиксировали два основных параметра: условный предел прочности при сжатии (в МПа) и максимальное усилие сжатия (в Н) для каждого отдельного образца.

Для проведения экспериментов использовались сегменты труб размером 60 × 10 мм (Рис. 1), которые изготавливали на токарном станке из отрезка № 3. Все испытания проводились на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100.



Рис. 1. – Образец 60х10 мм

Механические испытания как стандартных, так и модифицированных труб выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 11262-2017 (при растяжении) и ГОСТ 4651-2014 (при сжатии). Полученные значения основных механических характеристик приведены ниже:

- предел прочности при растяжении у исходного материала составил 25 МПа, после оптимизированной модификации - 30 МПа (увеличение примерно на 20 %);
- модуль упругости при растяжении в исходном состоянии - 1,1 ГПа, после модификации - 1,265 ГПа (рост примерно на 15 %);
- относительное удлинение при разрыве в исходном состоянии - 600 %, после модификации - 570 % (незначительное снижение на 5 %, что характерно при повышении жёсткости материала);
- условный предел прочности при сжатии у исходного материала - 22 МПа, после модификации - 25,3 МПа (увеличение примерно на 15 %).

При проведении испытаний на стойкость в дистиллированной воде при температуре +60 °C в течение 168 часов визуально не было зафиксировано никаких признаков растворения или вымывания компонентов из состава образцов.

После завершения выдержки на поверхности модифицированных образцов отсутствовали любые внешние проявления процессов старения: не наблюдалось ни изменения цвета, ни появления трещин, ни помутнения, ни других дефектов (см. Рис. 2 и Рис. 3).

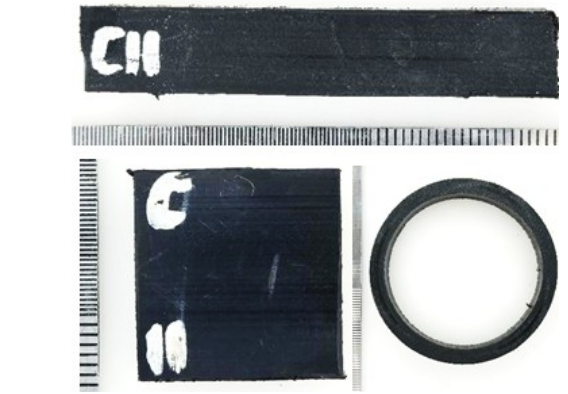


Рис. 2. – Фотоснимки образцов после испытаний в воде при +60оС и временем выдержки 168 часов

а б

Рис. 3. – Фотоснимок образца до/после испытаний в воде при температуре +60оС и временем 168 часов

Таблица №1

Изменение микротвёрдости поверхности образцов после выдержки в воде при +60 °C (168 ч)

Образец	Микротвёрдость HV (исходное состояние)	Микротвёрдость HV (после выдержки)	Изменение HV	Относительное изменение
20×20 мм, образец №1	5,37	5,98	+0,61	+11,4 %
20×20 мм, образец №2	5,07	6,09	+1,02	+20,1 %
Среднее значение	5,22	6,04	+0,82	+15,7 %

Параметры измерения: нагрузка на индентор - 30 г, время выдержки под нагрузкой - 10 с.

Примечание: после выдержки в воде при температуре +60 °C в течение 168 часов зафиксировано увеличение микротвёрдости поверхности образцов в среднем на 15-16 % (диапазон изменений от +11,4 % до +20,1 % в зависимости от конкретного образца).

Полученные данные свидетельствуют о положительном влиянии выдержки на поверхностную твёрдость материала, что может быть связано с уплотнением структуры и перераспределением внутренних напряжений в процессе термической обработки в водной среде.

Результаты и обсуждение

Для объективной оценки эффективности предложенного подхода к наномодификации полиэтилена высокой плотности (ПНД) и выявления влияния концентраций модификаторов на механические характеристики был реализован полный факторный эксперимент типа 2^4. Такой план включает 16 основных опытов плюс контрольный опыт №0 (всего 17 комбинаций), что позволяет систематически определить как линейные эффекты каждого фактора, так и эффекты их парных, тройных и четверных взаимодействий при минимальном объёме экспериментальной работы.

Выбор факторов и уровней их варьирования основан на результатах предварительных исследований и учитывает технологические ограничения:

x_1 - содержание углеродных нанотрубок (CNT): нижний уровень 0,5 мас. %, верхний - 1,0 мас. %;

x_2 - содержание графена (Graphene): 0,5 мас. % и 2,0 мас. % соответственно;

x_3 - содержание диоксида титана (TiO_2): 1,0 мас. % и 5,0 мас. %;

x_4 - содержание нанокремнезёма (SiO_2): 1,0 мас. % и 5,0 мас. %.

В качестве откликов (целевых функций) были выбраны четыре ключевых механических показателя:

Y_1 - предел прочности при растяжении, МПа;

Y_2 - модуль упругости при растяжении, ГПа;

Y_3 - относительное удлинение при разрыве, %;

Y_4 - условный предел прочности при сжатии, МПа.

Схематическое представление факторов x_1-x_4 и целевых откликов Y_1-Y_4 показано на Рис. 4.



Рис. 4. – Параметры состава и структуры полиэтиленовых труб с нанодобавками для оперативной оценки их механических свойств

Экспериментальные и расчётные значения откликов x_1, а также их относительные отклонения приведены в Таблице 2.

Таблица №2

Матрица планирования эксперимента 2^4 и результаты измерений/расчётов

План эксперимента позволил получить регрессионные модели вида:

$$Y = b_0 + \Sigma\, b_i x_i + \Sigma\, b_{ij} x_i x_j + \Sigma\, b_{ijk} x_i x_j x_k + b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4$$

где коэффициенты b определялись методом наименьших квадратов по результатам 16 опытов. Контрольный опыт №0 (все факторы на нулевом

уровне) использовался для оценки адекватности модели и расчёта чистой ошибки эксперимента.

Exper. number	CNT, %	Graphene, %	TiO_2, %	SiO_2, %	Y_1 exp / calc. (MPa)	Deviation, %	Y_2 exp / calc. (GPa)	Deviation, %	Y_3 exp / calc. (%)	Deviation, %	Y_4 exp / calc. (MPa)	Deviation, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0.5	0.5	1.0	1.0	32.67 / 33.26	+1.81	1.27 / 1.29	+1.57	566.62 / 558.85	–1.37	28.08 / 27.34	–2.64
1	0.5	0.5	1.0	5.0	41.59 / 43.10	+3.63	1.72 / 1.66	–3.49	491.55 / 503.73	+2.48	32.40 / 35.20	+8.64
2	0.5	0.5	5.0	1.0	38.07 / 39.16	+2.86	1.45 / 1.44	–0.69	565.33 / 543.22	–3.90	32.53 / 32.61	+0.25
3	0.5	0.5	5.0	5.0	50.44 / 48.99	–2.88	1.74 / 1.81	+4.02	464.78 / 488.09	+5.00	39.16 / 40.46	+3.32
4	0.5	2.0	1.0	1.0	37.06 / 37.79	+1.97	1.65 / 1.53	–7.27	545.64 / 519.92	–4.71	31.14 / 32.00	+2.76
5	0.5	2.0	1.0	5.0	46.94 / 47.63	+1.47	1.87 / 1.90	+1.60	443.79 / 464.80	+4.73	41.38 / 39.85	–3.70
6	0.5	2.0	5.0	1.0	45.86 / 43.69	–4.73	1.72 / 1.68	–2.33	481.73 / 504.29	+4.68	38.52 / 37.26	–3.27
7	0.5	2.0	5.0	5.0	54.51 / 53.52	–1.82	1.92 / 2.05	+6.77	472.61 / 449.16	–4.96	46.62 / 45.11	–3.24
8	1.0	0.5	1.0	1.0	32.35 / 31.92	–1.33	1.35 / 1.36	+0.74	581.71 / 562.64	–3.28	27.40 / 27.54	+0.51
9	1.0	0.5	1.0	5.0	44.29 / 41.76	–5.71	1.75 / 1.74	–0.57	517.40 / 507.51	–1.91	35.96 / 35.39	–1.58
10	1.0	0.5	5.0	1.0	37.24 / 37.82	+1.56	1.47 / 1.51	+2.72	533.89 / 547.00	+2.50	33.55 / 32.80	–2.23
11	1.0	0.5	5.0	5.0	47.00 / 47.65	+1.38	1.95 / 1.89	–3.08	481.64 / 491.88	+2.13	42.92 / 40.65	–5.29
12	1.0	2.0	1.0	1.0	39.22 / 36.45	–7.06	1.54 / 1.60	+3.90	494.52 / 523.71	+5.90	32.42 / 32.19	–0.71
13	1.0	2.0	1.0	5.0	44.09 / 46.29	+4.99	1.91 / 1.98	+3.66	468.51 / 468.58	+0.01	40.76 / 40.04	–1.77
14	1.0	2.0	5.0	1.0	39.98 / 42.35	+5.93	1.71 / 1.76	+2.92	498.25 / 508.07	+1.97	35.54 / 37.45	+5.37
15	1.0	2.0	5.0	5.0	52.24 / 52.18	–0.11	2.31 / 2.13	–7.79	486.42 / 452.95	–6.88	42.82 / 45.30	+5.79

В результате обработки данных полного факторного эксперимента 2^4 были построены регрессионные уравнения, описывающие зависимость механических свойств модифицированного полиэтилена высокой плотности (ПНД PE100) от концентраций четырёх нанонаполнителей. Полученные модели представлены ниже (1)-(4):

$$Y_1 = 29{,}16 - 2{,}68 \cdot CNT + 3{,}02 \cdot Графен + 1{,}47 \cdot TiO_2 + 2{,}46 \cdot SiO_2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0{,}99 + 0{,}16 \cdot CNT + 0{,}16 \cdot Графен + 0{,}04 \cdot TiO_2 + 0{,}09 \cdot SiO_2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 585{,}73 + 7{,}57 \cdot CNT - 25{,}95 \cdot Графен - 3{,}91\ TiO_2 - 13{,}78\ SiO_2 \quad (3)$$

$$Y_4 = 22{,}32 + 0{,}38 \cdot CNT + 3{,}10 \cdot Графен + 1{,}32 \cdot TiO_2 + 1{,}96\ SiO_2 \quad (4)$$

где: Y_1 - предел прочности при растяжении, МПа;

Y_2 - модуль упругости при растяжении, ГПа;

Y_3 - относительное удлинение при разрыве, %;

Y_4 - условный предел прочности при сжатии, МПа;

CNT, Графен, TiO_2, SiO_2 - концентрации соответствующих нанонаполнителей в мас. % (в кодированном виде: -1 и +1 соответствуют нижнему и верхнему уровням).

Статистическая значимость и адекватность построенных моделей (1)-(4) были оценены по комплексу стандартных критериев, результаты которых приведены в Таблице 3.

Таблица №3

Основные статистические характеристики адекватности регрессионных моделей

Свойство	R^2	F-критерий Фишера	p-уровень	G-критерий Кохрена	Вывод по модели
Прочность на растяжение	0.942	44.38	0.0000	0.3081 (< 0.334)	Значима, дисперсии гомогенны
Модуль упругости	0.906	26.41	0.0000	0.2227 (< 0.334)	Значима, дисперсии гомогенны
Относительное удлинение	0.756	8.53	0.0022	0.1910 (< 0,334)	Значима, дисперсии гомогенны
Прочность на сжатие	0.930	36.51	0.0000	0.2113 (< 0.334)	Значима, дисперсии гомогенны

Коэффициенты детерминации полученных моделей находятся в диапазоне R^2 = 0,756-0,942. Это означает, что построенные уравнения объясняют от 75,6 % до 94,2 % общей изменчивости откликов, что свидетельствует о достаточно высокой степени адекватности математического описания.

Значения F-критерия Фишера существенно превышают табличное (Fтабл ≈ 3,01 при уровне значимости p = 0,05, степени свободы $k_1 = 4$ и $k_2 = 11$). Все четыре модели демонстрируют статистическую значимость ($p < 0{,}05$), что подтверждает надёжность выявленных зависимостей.

Однородность дисперсий воспроизводимости проверена с помощью G-критерия Кохрена: расчётные значения оказались ниже табличного (Gтабл = 0,334 для 16 опытов). Таким образом, погрешности эксперимента не искажают результаты и могут считаться приемлемыми.

Среднее абсолютное отклонение расчётных значений от экспериментальных по всем откликам составило 3,8 % (диапазон отклонений 1,3-8,6 %), что находится в пределах типичной погрешности для механических испытаний полимерных композитов и подтверждает высокую точность моделей.

Анализ влияния факторов приведен ниже:

1. Графен (x_2) оказывает наиболее сильное положительное воздействие на прочностные показатели:

- наибольший положительный коэффициент в уравнении для предела прочности при растяжении ($b_2 = +3{,}02$);

- самый высокий вклад в прочность при сжатии ($b_2 = +3{,}10$). В то же время графен даёт наиболее выраженное отрицательное влияние на относительное удлинение при разрыве ($b_2 = -25{,}95$). Это типичное поведение для жёстких пластинчатых наполнителей: графен эффективно армирует полимерную матрицу, повышая модуль упругости и прочность, однако ограничивает подвижность макромолекулярных цепей, что приводит к снижению пластичности.

2. Углеродные нанотрубки (CNT, x_1) положительно влияют на пластические свойства:

- единственный положительный вклад в относительное удлинение при разрыве ($b_1 = +7{,}57$);

- умеренное увеличение модуля упругости ($b_1 = +0{,}16$);

- слабое отрицательное влияние на предел прочности при растяжении ($b_1 = -2{,}68$), что может быть связано с локальной агломерацией нанотрубок при низких концентрациях в изученном диапазоне.

3. Диоксид титана (TiO_2, x_3) и нанокремнезём (SiO_2, x_4) выполняют стабилизирующую и барьерную функции:

- TiO_2 даёт умеренный положительный вклад в прочностные характеристики ($b_3 = +1{,}47$ для Y_1 и $+1{,}32$ для Y_4) при слабом отрицательном влиянии на удлинение ($b_3 = -3{,}91$);

- SiO_2 оказывает более сильное положительное воздействие на прочность ($b_4 = +2{,}46$ для Y_1 и $+1{,}96$ для Y_4) при заметном снижении пластичности ($b_4 = -13{,}78$).

Оба оксидных наполнителя действуют как эффективные УФ-стабилизаторы и создают дополнительный барьер для диффузии кислорода и влаги, что критически важно для повышения долговременной стойкости трубопроводов в условиях эксплуатации.

На основе матрицы планирования полного факторного эксперимента (см. Таблица 2) и полученных регрессионных уравнений (3.1)-(3.4) выполнен детальный анализ вклада каждого из четырёх факторов модифицирования в изменение целевых механических характеристик полиэтиленовых труб из ПНД PE100.

Результаты количественной оценки влияния факторов представлены в виде столбчатых диаграмм на рис. 5 и рис. 6. На этих гистограммах наглядно отображены величины и знаки коэффициентов регрессии (b_i), отражающие силу и направление воздействия каждого параметра (CNT, Графен, TiO_2, SiO_2) на отклики Y_1-Y_4.

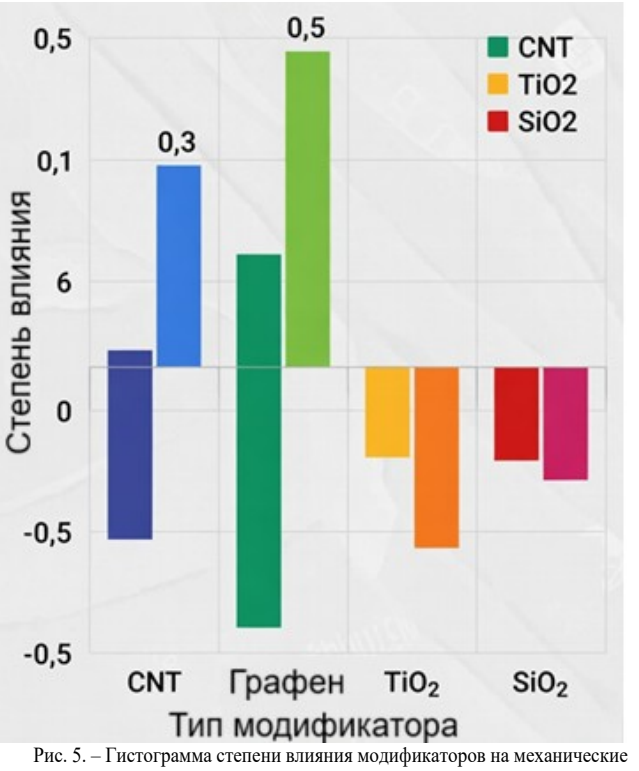
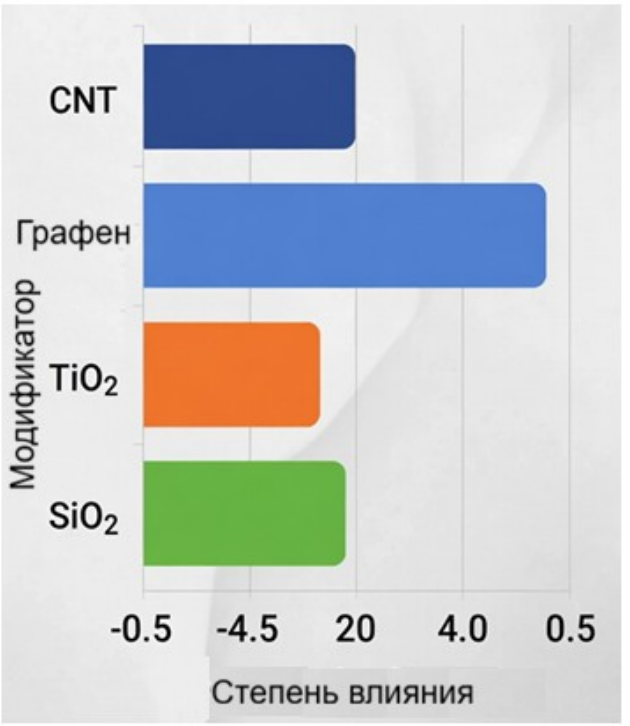


Рис. 5. – Гистограмма степени влияния модификаторов на механические свойства полиэтиленовых труб (коэффициенты регрессии b_i, нормированные)

На рис. 5 представлена гистограмма, отражающая степень влияния каждого из четырёх нанонаполнителей на механические характеристики полиэтиленовых труб (нормированные коэффициенты регрессии b_i).

Рис. 6 иллюстрирует абсолютные значения коэффициентов влияния (по модулю). На этой диаграмме наиболее ярко проявляется доминирующая роль графена и нанокремнезёма (SiO_2) в улучшении прочностных характеристик (Y_1 и Y_4), в то время как CNT выделяется как основной фактор сохранения и повышения пластичности (Y_3).

Рис. 6. – Гистограмма абсолютных значений коэффициентов влияния (по модулю)



На основании анализа коэффициентов регрессии и целевых требований к механическим свойствам труб (предел прочности при растяжении ≥ 40 МПа, модуль упругости ≥ 1,6 ГПа, относительное удлинение при разрыве ≥ 400 %, условный предел прочности при сжатии ≥ 35 МПа) был определён оптимальный состав наноструктурированной композиции:

- CNT - 0,8 мас. %;
- Graphene - 1,5 мас. %;
- TiO_2 - 2,5 мас. %;
- SiO_2 - 2,5 мас. %.

Полный факторный эксперимент 2^4 (16 основных опытов + контрольный опыт №0) подтвердил высокую надёжность и адекватность разработанной методики наномодификации полиэтилена высокой плотности. Статистическая оценка моделей показала:

- коэффициенты детерминации R^2 в диапазоне 0,756-0,942;
- расчётные значения критерия Фишера значительно превышают табличные ($F > F_{табл}$ при $p = 0,05$);
- дисперсии воспроизводимости однородны ($G < G_{табл}$);
- средняя относительная погрешность между расчётными и экспериментальными значениями составляет 3,8 % (диапазон 1,3-8,6 %).

Таким образом, графен и нанокремнезём (SiO_2) выступают ключевыми компонентами для достижения высокой прочности и жёсткости, углеродные нанотрубки (CNT) обеспечивают необходимый уровень пластичности, а диоксид титана (TiO_2) выполняет стабилизирующую функцию. Предложенный оптимальный состав гарантирует сбалансированное сочетание прочностных, жёсткостных и пластических свойств, что делает его перспективным для промышленного производства полиэтиленовых труб с существенно повышенной долговечностью и эксплуатационной надёжностью.

Выводы

Проверка адекватности метода на экспериментальных образцах проведена с использованием полного факторного эксперимента 2^4 (16 опытов), что позволило выявить влияние концентраций модификаторов на свойства и получить рациональный состав: CNT 0,8 мас. %, Графен 1,5 мас. %, TiO_2 2,5 мас. %, SiO_2 2,5 мас. %. Полученные регрессионные модели статистически значимы ($R^2 = 0,756$-$0,942$, $p < 0,05$), с погрешностью расчёта 3,8-8,6 %. Графен и SiO_2 дают наибольший вклад в прочностные характеристики (+3,02 и +2,46 для прочности на растяжение), но снижают удлинение (-25,95 и -13,78), что требует баланса для сохранения пластичности. Это соответствует существующим моделям, в которых дефекты в швах и стенке труб снижают срок службы, а наномодификация минимизирует влияние таких дефектов.

Литература

1. Ванг Х. и др. Всесторонний обзор полиэтиленовых труб: механизмы разрушения, модели эксплуатационных характеристик, методы контроля и решения для ремонта // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2024. Том 4. С. 100174. https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100174
2. Алешин Н.П. и др. Исследование применимости метода TOFD для контроля сварных соединений полиэтиленовых труб // Russ J Неразрушающий контроль. 2020. Том 56. С. 775-783. https://doi.org/10.1134/S1061830920100022
3. Карим М.А., Абдулла М.З., Дейфалла А.Ф., Азаб М. и Вакар А. (2023) Оценка технологических параметров и применения армированных волокнами полимеров (FRPS) в нефтяной и газовой промышленности: обзор. Результаты в области инженерии, 18, 101091. https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.101091
4. Агарвал У., ван Вестренен Дж. Микроструктурные характеристики полиэтилена высокой плотности для толстостенных напорных труб // Испытания полимеров. 2024. Том 136. 108491. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108491
5. Ли Дж., Би Ю., Чжао Б., Цзу Л., Ян К. и Конг С. (2022) Термомеханические свойства композитов эпоксидная смола/базальтовое волокно/гидротальцит и влияние размера частиц гидротальцита на их свойства. Полимерные композиты, 43, 955-963. https://doi.org/10.1002/PC.26425
6. Куличихин В.Г., Малкин А.Ю. Роль структуры в реологии полимеров // Полимеры. 2022. Том 14. Номер 6. С. 1262. https://doi.org/10.3390/polym14061262
7. Цзян Л. и др. Влияние характеристик волокон на растягивающие и ударные свойства полиэтилена высокой плотности, армированного длинными волокнами // Полимерные композиты. 2024. Том 45. С. 11138-11148. https://doi.org/10.1002/pc.28537
8. Гоголков А.В. и др. Полимерные нанокомпозиты с металлизированными углеродными нанотрубками: синтез, структура и свойства // Пластические массы. 2025. №1. С. 38-41. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2025-01-38-41
9. Мазитова А.К. и др. Наполнители для полимерных композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14. № 4. С. 294-299. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-294-299
10. Вафаева Х.М. и др. Получение и механические свойства гибридного полимерного композита, армированного волокнами, с графеновыми нанопластинками и многослойными углеродными нанотрубками // Cogent Engineering. 2024. Том 11. №1. DOI 10.1080/23311916.2024.2343586
11. Ян Дж., Чжан К., Чен Д., Чжан Х. и Чжан Ю. (2024) Получение и свойства ПВХ-композитов, наполненных порошкообразным гибридным аттапульгитом из скорлупы грецкого ореха. Журнал виниловых и аддитивных технологий, 30, 263-276. https://doi.org/10.1002/VNL.22046
12. Бен Халифа А., Брахем Н., Брайек С., Зитун Р. и Зиди М. (2022) Экспериментальное исследование поведения собранных гибридных композитных труб при изгибе в трех точках до и после испытания на огнестойкость. Журнал композитных материалов, 56, 2933-2948. https://doi.org/10.1177/00219983221107094
13. Ярычева А.В. и др. Влияние наноразмерных ограничений на кристаллизацию полиэтиленоксида в порах полиолефинов // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2021. Т. 63. №6. С. 422-429. https://doi.org/10.31857/S2308112021060146
14. Аскар М.К. и др. Использование полиэтилентерефталата ПЭТ в бетоне: обзор // Полимеры. 2023. Том 15. С. 3320. https://doi.org/10.3390/polym15153320
15. Шеннон К.Э., Уивер У. Математическая теория коммуникации. Издательство Университета Иллинойса, 1949.
16. Янг Х., Фан Б. и Лю К., Унифицированная структура для моделирования процесса старения типичных микропластиков // Загрязнение окружающей среды, 2025. Том 386, стр.127300. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127300
17. Анитас Э.М. и др. Структурные свойства детерминированных мультифракталов, подобных Вицеку // Симметрия. 2019. Том 11. С. 806. https://doi.org/10.3390/SYM11060806
18. Ниан Д., Фу З. Основанный на расширенном самоподобии мультифрактальный анализ отклоняющихся флуктуаций // Коммуникации в нелинейной науке и численном моделировании. 2019. Том 67. С. 568-576. https://doi.org/10.1016/J.CNSNS.2018.07.034
19. Дуань К. и др. Обзор о применении теории фракталов в исследовании упаковочных материалов // Материалы. 2021. Том 14. С. 860. https://doi.org/10.3390/MA14040860
20. Волчук В.М. и др. Применение теории фракталов для оценки влияния неметаллических включений на механические свойства стали S355J2 // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. 2021. Том 1021. 012053. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012053
21. Чжан П. и др. Фрактальный анализ микроструктуры композитов на цементной основе и его применение для оценки макроскопических характеристик композитов на цементной основе: Обзор // Fractal and Fractional. 2024. Том 8. С. 304. https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT8060304
22. Лю Кью и др. Фрактальная размерность бетона, содержащего диоксид кремния, и ее корреляция со структурой пор, прочностью и проницаемостью // Строительство и строительные материалы. 2019. Том 228. 116986. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.116986
23. Воронов А.С. и др. Гибридный полимер, армированный стеклобазальтовым волокном (HGBFRP) Трубы для быстровозводимого строительства в условиях умеренного климата и Арктики: обзор // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2025. Том 119. №5. https://unistroy.spbstu.ru/article/2025.119.5/

24. Вафаева К.М. и др. Мониторинг гибридных стеклобазальтопластиковых труб: фрактальный подход к анализу отказов // Матер. рез. Express. 2025. Vol. 12. 075307. https://doi.org/10.1088/2053-1591/adf161
25. Баруздин А.А., Закревская Л.В. Композиционные материалы на основе твердых вторичных отходов сшитого полиэтилена // Композиционные материалы. 2025. Том 17. С. 798-811. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-2-798-811

The Effect of Nanofiller Concentrations on the Mechanical Properties of Polyethylene Pipes: Results of a Full Factorial Design Experiment

Voronov A.S.
Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

This article is devoted to an experimental study of the effect of nanofiller concentrations on the mechanical properties of polyethylene pipes using a 2^4 full factorial design experiment. The main objective of the study is to develop and test a method for targeted optimization of the mechanical properties of nanostructured polyethylene pipes (HDPE PE100) using a 2^4 full factorial design experiment and constructing regression models for the dependence of properties on the concentrations of four nanofillers.

The use of a 2^4 full factorial experiment allowed us to systematically identify the linear and interactive effects of nanofillers and propose a balanced formulation that provides a significant increase in strength (+15-20%) with an acceptable level of ductility. The developed approach significantly reduces the amount of experimental work and can be used to optimize nanostructured polymer composites in the pipe industry.

Keywords: polyethylene pipes, nanomodification, full factorial experiment, regression models, carbon nanotubes, graphene, mechanical properties, formulation optimization.

References

1. Wang H. et al. A comprehensive review of polyethylene pipes: Failure mechanisms, performance models, inspection methods, and repair solutions // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2024. Vol. 4. P. 100174. https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100174
2. Aleshin N.P. et al. Studying Applicability of TOFD Technique to Inspection of Welded Joints in Polyethylene Pipes // Russ J Nondestruct Test. 2020. Vol. 56. P. 775-783. https://doi.org/10.1134/S1061830920100022
3. Karim, M.A., Abdullah, M.Z., Deifalla, A.F., Azab, M. and Waqar, A. (2023) An Assessment of the Processing Parameters and Application of Fibre-Reinforced Polymers (FRPs) in the Petroleum and Natural Gas Industries: A Review. Results in Engineering, 18, 101091. https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.101091
4. Agarwal U., van Westrenen J. Microstructural design characteristics of high-density polyethylene for thick-walled pressure pipe applications // Polymer Testing. 2024. Vol. 136. 108491. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108491
5. Li, J., Bi, Y., Zhao, B., Zu, L., Yang, Q. and Cong, S. (2022) Thermomechanical Properties of Epoxy Resin/Basalt Fiber/Hydrotalcite Composites and Influence of Hydrotalcite Particle Size on Their Properties. Polymer Composites, 43, 955-963. https://doi.org/10.1002/PC.26425
6. Kulichikhin V.G., Malkin A.Y. The role of structure in polymer rheology // Polymers. 2022. Vol. 14. N6. P. 1262. https://doi.org/10.3390/polym14061262
7. Jiang L. et al. Effects of fiber characteristics on tensile and impact properties of long fiber reinforced High-Density Polyethylene // Polymer Composites. 2024. Vol. 45. P. 11138-11148. https://doi.org/10.1002/pc.28537
8. Щегольков А.В. et al. Полимерные нанокомпозиты с металлизированными углеродными нанотрубками: синтез, структура и свойства // Пластические массы. 2025. №1. С. 38-41. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2025-01-38-41
9. Mazitova A.K. et al. Fillers for polymer composite materials // Nanotechnologies in Construction. 2022. Vol. 14. N4. P. 294-299. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-294-299
10. Vafaeva Kh.M. et al. Fabrication and mechanical properties of hybrid fibre-reinforced polymer hybrid composite with graphene nanoplatelets and multiwalled carbon nanotubes // Cogent Engineering. 2024. Vol. 11. No.1. DOI 10.1080/23311916.2024.2343586
11. Yang, J., Zhang, K., Chen, D., Zhang, X. and Zhang, Y. (2024) Preparation and Properties of PVC Composites Filled with Walnut Shell Powder Hybrid Attapulgite. Journal of Vinyl and Additive Technology, 30, 263-276. https://doi.org/10.1002/VNL.22046
12. Ben Khalifa, A., Brahem, N., Braiek, S., Zitoune, R. and Zidi, M. (2022) Experimental Investigation of Three-Point Bending Behavior of Assembled Hybrid Composite Tubes before and after the Fire Endurance Test. Journal of Composite Materials, 56, 2933-2948. https://doi.org/10.1177/00219983221107094
13. Ярышева А.Ю. et al. Влияние наноразмерных ограничений на кристаллизацию полиэтиленоксида в порах полиолефинов // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2021. Т. 63. №6. С. 422-429. https://doi.org/10.31857/S2308112021060146
14. Askar M.K. et al. Utilizing Polyethylene Terephthalate PET in Concrete: A Review // Polymers. 2023. Vol. 15. P. 3320. https://doi.org/10.3390/polym15153320
15. Shannon C.E., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Univ of Illinois Press, 1949.
16. Yang, X., Fan, B. and Liu, C., A unified framework for simulating aging process of typical microplastics // Environmental Pollution, 2025. vol. 386 p.127300. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127300
17. Anitas E.M. et al. Structural Properties of Vicsek-like Deterministic Multifractals // Symmetry. 2019. Vol. 11. P. 806. https://doi.org/10.3390/SYM11060806
18. Nian D., Fu Z. Extended Self-Similarity Based Multi-Fractal Detrended Fluctuation Analysis // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2019. Vol. 67. P. 568-576. https://doi.org/10.1016/J.CNSNS.2018.07.034
19. Duan Q. et al. Review about the Application of Fractal Theory in the Research of Packaging Materials // Materials. 2021. Vol. 14. P. 860. https://doi.org/10.3390/MA14040860
20. Volchuk V.M. et al. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic Inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1021. 012053. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012053
21. Zhang P. et al. Fractal Analysis of Cement-Based Composite Microstructure and Its Application in Evaluation of Macroscopic Performance of Cement-Based Composites: A Review // Fractal and Fractional. 2024. Vol. 8. P. 304. https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT8060304
22. Lü Q. et al. Fractal Dimension of Concrete Incorporating Silica Fume and Its Correlations to Pore Structure, Strength and Permeability // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 228. 116986. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.116986
23. Voronov A.S. et al. Hybrid Glass-Basalt Fiber Reinforced Polymer (HGBFRP) Pipes for Prefabricated Construction in Temperate and Arctic Environments: A Review // Construction of Unique Buildings and Structures. 2025. Vol. 119. №5. https://unistroy.spbstu.ru/article/2025.119.5/
24. Vafaeva K.M. et al. Monitoring hybrid glass-basalt plastic pipes: a fractal approach to failure analysis // Mater. Res. Express. 2025. Vol. 12. 075307. https://doi.org/10.1088/2053-1591/adf161
25. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Composite materials based on hard recycled waste of crosslinked polyethylene // Composite materials. 2025. Vol. 17. P. 798-811. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-2-798-811