



Научно-исследовательский журнал «Chemical Bulletin»

<https://cb-journal.ru>

2026, Том 9, № 2 / 2026, Vol. 9, Iss. 2 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 678.674:678.046.2:678.027.3:004.356.2

DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-2-5

Технологическое окно экструзионного компаундирования PETG с коротким углеродным волокном для FFF-филамента

¹ Илюхин Д.А. *,

¹ Рязанский государственный радиотехнический университет,

* Ответственный автор E-mail: production@ergoplasika.ru

Аннотация: цели: обосновать технологическое окно опытно-промышленного экструзионного компаундирования полиэтилентерефталат-гликоля (PETG) с коротким углеродным волокном для последующего изготовления FFF-филамента и выделить параметры процесса, критические для воспроизводимости материала.

Методы. Проанализированы две рецептурные точки с массовой долей углеродного волокна 5 и 10 %, при постоянной доле малеинизированного полиэтилена низкой плотности 2 %. Подготовка PETG включала сушку при 65 °С в течение 3 ч, измельчение до 50–150 мкм и рассев. Компаундирование выполняли на двухшнековом экструдере диаметром 30 мм и L/D = 44 при 220 об/мин, давлении расплава 1,0 МПа и нагрузке привода 70 %. Применены описательный анализ производственных данных, расчет активной длины шнека, окружной скорости, массовых соотношений компонентов и декомпозиция температурного профиля по 11 зонам.

Результаты. Определено трехстадийное тепловое управление: повышение температуры от 200 до 240 °С, плато 240 °С, контролируемое снижение до 210 °С и конечная термостабилизация при 230 °С. Активная длина шнека составила 1,32 м, окружная скорость – 0,346 м/с. Для рецептур с 5 и 10 % волокна отношения PETG/волокно равны 18,6 и 8,8, а совместитель/волокно – 0,40 и 0,20 соответственно. Сформирована карта критических параметров от сушки исходного полимера до повторной сушки гранулята. Для филамента из опытной партии подтверждена технологическая печатаемость на оборудовании открытого типа; скрининговый диапазон модуля упругости при изгибе составил 3,5–4,0 ГПа.

Выводы. Воспроизводимость углеродонаполненного PETG определяется согласованным контролем влажности, дозирования, термомеханической истории и вытяжки стренги. Значение 3,5–4,0 ГПа корректно трактовать как модуль, а не прочность при изгибе. Количественное разделение влияния содержания и происхождения волокна требует последующего факторного эксперимента, реологических исследований, микроскопии и испытаний по стандартизированной методике.

Ключевые слова: PETG, короткое углеродное волокно, экструзионное компаундирование, технологическое окно, FFF, филамент, совместитель, температурный профиль

Для цитирования: Илюхин Д.А. Технологическое окно экструзионного компаундирования PETG с коротким углеродным волокном для FFF-филамента // Chemical Bulletin. 2026. Том 9. № 2. 5. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-2-5

Поступила в редакцию: 29 ноября 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 28 февраля 2026 г.; Принята к публикации: 31 апреля 2026 г.

Process window for twin-screw compounding of PETG with short carbon fibre for FFF filament

¹ Ilyukhin D.A. *,

¹ Ryazan State Radio Engineering University,

* Corresponding author E-mail: production@ergoplasika.ru

Abstract: objectives: to establish a process window for pilot-scale twin-screw compounding of polyethylene terephthalate glycol (PETG) with short carbon fibre for subsequent FFF filament production and to identify the parameters that are critical to material reproducibility.

Methods. Two formulations containing 5 and 10 wt% carbon fibre and 2 wt% maleic-anhydride-functionalised low-density polyethylene were analysed. PETG was dried at 65 °C for 3 h, milled to 50–150 µm and sieved. Compounding was performed in a 30 mm twin-screw extruder with L/D = 44 at 220 rpm, a melt pressure of 1.0 MPa and a drive load of 70%. Descriptive analysis included screw length, peripheral speed, component mass ratios and the 11-zone thermal profile.

Results. The thermal sequence comprised heating from 200 to 240 °C with a 240 °C plateau, controlled cooling to 210 °C, and terminal stabilisation at 230 °C. The active screw length was 1.32 m and the peripheral speed was 0.346 m/s. For 5 and 10 wt% fibre, PETG-to-fibre ratios were 18.6 and 8.8, while compatibiliser-to-fibre ratios were 0.40 and 0.20. A critical-parameter map covering initial polymer drying through final pellet drying was developed. Pilot-batch filament was processable on an open-frame FFF printer; the screening flexural modulus was 3.5–4.0 GPa.

Conclusions. Reproducible carbon-filled PETG requires coordinated control of moisture, feeding, thermomechanical history and strand drawing. The 3.5–4.0 GPa value is flexural modulus, not flexural strength. Separating fibre-content and supplier effects requires factorial experiments, rheology, microscopy and standardised mechanical testing.

Keywords: PETG, short carbon fiber, extrusion compounding, process window, FFF, filament, joint, temperature profile

For citation: Ilyukhin D.A. Process window for twin-screw compounding of PETG with short carbon fibre for FFF filament. Chemical Bulletin. 2026. 9 (2). 5. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-2-5

The article was submitted: November 29, 2025; Approved after reviewing: February 28, 2026; Accepted for publication: April 31, 2026.

Введение

Экструзионная 3D-печать методом послойного наплавления (fused filament fabrication, FFF) переносит часть структурообразования материала с предприятия – изготовителя филамента непосредственно в печатающую головку и зону укладки расплава. Поэтому свойства изделия определяются не только химической природой полимера, но и совокупностью последовательных стадий: подготовкой сырья, компаундированием, формованием нити, хранением, сушкой перед печатью и параметрами послойного построения. Для PETG это особенно существенно: даже ненаполненный материал после FFF демонстрирует зависимость механических, оптических и теплофизических характеристик от ориентации образца и режима печати [1, 2].

Преимущество PETG как матрицы связано с сочетанием технологичности расплава, размерной стабильности и меньшей склонности к короблению по сравнению с рядом высокотемпературных инженерных термопластов. Вместе с тем переход от прототипа к функциональной детали ограничивается анизотропией послойной структуры, остаточной пористостью и чувствительностью межслойного сплавления к температурно-скоростному режиму. Оптимизация только параметров FFF способна улучшить прочность печатной детали [3], но не устраняет неоднородность композиционного филамента, возникшую на стадии его производства.

Отдельный фактор риска – вода, сорбированная полиэфирной матрицей. При переработке влажного PETG повышается вероятность гидролитического разрыва макромолекул, а изменение молекулярной массы отражается на реологии расплава и механических свойствах напечатанного материала. Количественная оценка гидролитической деградации PETG при хранении и FFF показала необходимость учитывать историю кондиционирования материала [4]. В более поздней работе установлено, что предварительная сушка

влияет на физико-механические характеристики напечатанных моделей [5]. Следовательно, режим удаления влаги должен рассматриваться как элемент технологического окна, а не как вспомогательная операция.

Короткое углеродное волокно вводят в PETG для повышения жесткости и регулирования усадки, однако его действие не является однозначно положительным. Армирующая фаза меняет вязкость, теплопроводность и характер течения, увеличивает абразивность и может способствовать образованию пустот. García и соавт. показали, что углеродное наполнение влияет не только на механические, но и на геометрические характеристики FFF-образцов [6]. В работе Mahesh и соавт. наличие межфазных дефектов и пустот ограничивало эффект короткого волокна [7], тогда как Kichloo и соавт. зафиксировали выраженное изменение механического и трибологического поведения PETG-композита [8]. Эти результаты подчеркивают: массовая доля волокна сама по себе не описывает качество материала.

Исследования последних лет подтверждают сильную связь между структурой печати и свойствами углеродонаполненного PETG. Для различных архитектур ячеек и траекторий укладки получены различающиеся уровни жесткости и разрушения [9]. Batista и соавт. выявили совместное влияние углеродного наполнителя и параметров FFF на механические и трибологические характеристики [10]. При сравнении коммерческих материалов с 15 и 30 мас. % короткого волокна более высокая доля наполнителя не обеспечила пропорционального выигрыша во всех характеристиках; результат зависел от пористости и качества формования [11]. Esonomides и соавт. также показали значимую роль температуры сопла, высоты слоя и ориентации раstra [12].

Большинство опубликованных работ рассматривает уже готовый филамент и варьирует параметры печати. Значительно реже формализуется предшествующее технологическое окно компаундирования, хотя именно на этой стадии задаются дисперсность, термомеханическая история матрицы, равномерность дозирования и способность волокна ориентироваться при вытяжке стренги. Для малых и средних производств отсутствие такого описания приводит к переносу режима между составами по принципу «одни и те же температуры и обороты», без учета изменения отношения матрицы, наполнителя и функциональной добавки.

В настоящей работе использованы данные опытно-промышленной отработки PETG-компаунда с двумя массовыми долями короткого углеродного волокна – 5 и 10 %. В отличие от описательного перечисления операций, процесс представлен как система взаимосвязанных управляющих воздействий и контролируемых признаков. Научная новизна работы состоит в количественной декомпозиции режима двухшнекового компаундирования, выделении трехстадийного температурного профиля и построении карты критических параметров качества для последующего проверяемого масштабирования.

Цель исследования – обосновать технологическое окно экструзионного компаундирования PETG с коротким углеродным волокном для FFF-филамента. Для достижения цели решали следующие задачи: (1) систематизировали рецептуры и операции подготовки сырья; (2) рассчитали геометрические и скоростные параметры рабочего органа; (3) проанализировали температурный профиль по функциональным стадиям; (4) связали возможные отклонения процесса с контролируемыми признаками; (5) определили границы интерпретации имеющихся механических данных.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования являлся технологический процесс получения гранулированного компаунда на основе PETG, малеинизированного полиэтилена низкой плотности (ПЭ-г-МА) и короткого углеродного волокна. Экспериментальная отработка выполнена на производственной площадке ООО «Эргопластика» (Рязань). Анализировали две полностью заданные рецептурные точки. Данные по третьему, отечественному источнику волокна UFC (ООО «ЗУКМ», Челябинск) в исходных производственных материалах не содержали завершеного массового баланса; поэтому этот вариант не включали в количественное сравнение и не использовали для расчета эффекта состава.

Вариант А содержал 10 мас. % углеродного волокна, вариант Б – 5 мас. %. Доля ПЭ-г-МА в обоих вариантах составляла 2 мас. %. Постоянная абсолютная доля функциональной добавки при изменении содержания волокна означает, что относительное количество добавки на единицу наполнителя различалось вдвое. Этот факт учитывали при интерпретации и не рассматривали рецептуры как однофакторное сравнение только по содержанию волокна.

Таблица 1

Состав исследованных рецептур и расчетные массовые отношения.

Table 1

Formulations studied and calculated mass ratios.

Показатель	Вариант А	Вариант Б
PETG, мас. %	88	93
ПЭ-г-МА, мас. %	2	2
Углеродное волокно, мас. %	10	5
Массовый баланс, %	100	100
PETG/волокно, кг/кг	8,8	18,6
ПЭ-г-МА/волокно, кг/кг	0,20	0,40

Примечание: Для партии массой 100 кг вариант А соответствует 88 кг PETG, 2 кг ПЭ-г-МА и 10 кг волокна; вариант Б – 93, 2 и 5 кг соответственно. Расчеты выполнены автором по производственным рецептурам.

Note: For a 100 kg batch, option A corresponds to 88 kg PETG, 2 kg PE-g-MA, and 10 kg fiber; option B – 93, 2, and 5 kg combined. Calculations are based on the second production recipe.

Гранулы PETG перед смешением выдерживали в осушающем оборудовании при 65 °С в течение 3 ч, после чего охлаждали естественным образом в условиях, исключающих повторное интенсивное увлажнение. Далее гранулы измельчали на дисковой мельнице с вертикальным расположением дисков. Целевая фракция 50–150 мкм составляла около 90 % массы; пылевую часть удаляли на вибрационном сите. Измельченный ПЭ-г-МА вводили без отдельной сушки при хранении в закрытой таре. Углеродное волокно использовали в короткорезаной форме; сведения о распределении длины и поверхностной обработке волокна в производственных протоколах отсутствовали, что учтено как ограничение исследования.

Предварительное смешение выполняли в высокоскоростном контейнерном смесителе с планетарным движением двух рабочих органов. Производственный контроль смеси включал оптический скрининг однородности и определение угла естественного откоса для оценки подачи в бункере дозатора без виброактиватора. Эти показатели использовали как оперативные, а не как замену количественной микроскопии или статистической оценке распределения волокна.

Компаундирование проводили на двухшнековом экструдере с диаметром шнека $D = 30$ мм и отношением длины к диаметру $L/D = 44$. Частота вращения шнеков составляла 220 об/мин, частота вращения дозатора – 40 об/мин, давление расплава – 10 бар (1,0 МПа), нагрузка привода – 70 %. Стренги отводили к гранулятору, работающему при 1400 об/мин. После грануляции материал повторно сушили при 65 °С в течение 3 ч и упаковывали в клапанные полиэтиленовые мешки.

Таблица 2

Заданные параметры опытно-промышленного процесса.

Table 2

Set points of the pilot-scale process.

Параметр	Значение	Функциональная роль
Диаметр шнека	30 мм	геометрический масштаб канала
Отношение L/D	44	длина пластикации и диспергирования
Частота вращения шнеков	220 об/мин	обновление поверхности и сдвиг
Давление расплава	10 бар / 1,0 МПа	косвенный контроль сопротивления потоку
Нагрузка привода	70 %	косвенный контроль крутящего момента
Частота вращения дозатора	40 об/мин	стабильность массовой подачи
Частота вращения гранулятора	1400 об/мин	вытяжка и резка стренги
Сушка гранулята	65 °С; 3 ч	снижение влагосодержания перед формованием

Активную длину шнека L и окружную скорость поверхности v рассчитывали по выражениям:

$$L = (L/D) \cdot D = 44 \cdot 30 = 1320 \text{ мм} = 1,32 \text{ м} \quad (1)$$

$$v = \pi \cdot D \cdot n / 60 = \pi \cdot 0,030 \cdot 220 / 60 = 0,346 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \quad (2)$$

где D – диаметр шнека, м; n – частота вращения, мин^{-1} . Массовые отношения PETG/волокно и ПЭ-г-МА/волокно определяли делением соответствующих массовых долей. Температурный диапазон рассчитывали как разность максимальной и минимальной уставок; конечный подъем температуры – как разность уставок формирующей зоны и локального минимума перед ней.

Дизайн работы является описательным технологическим скринингом. Рецептуры не образуют строгий однофакторный эксперимент, поскольку одновременно различались доля и происхождение волокна, а абсолютная доля ПЭ-г-МА оставалась постоянной. Поэтому статистическое сравнение составов и причинная атрибуция механического результата отдельному фактору не выполнялись. Диапазон 3,5–4,0 ГПа приведен по внутренним испытаниям филамента из опытной партии. Поскольку показатель выражен в гигапаскалях и характеризует жесткость, в настоящей работе он трактуется как модуль упругости при изгибе, а не как прочность при изгибе, для которой обычно указывают напряжение разрушения в мегапаскалях.

Для формализации процесса применили причинно-технологическую декомпозицию: каждой операции сопоставляли управляемый параметр, вероятное отклонение и доступный производственный признак. Такой подход не заменяет статистическое управление процессом, но задает проверяемую структуру для последующего накопления данных и переноса режима на другую производительность.

Результаты и обсуждения

Исходный профиль по 11 зонам составил 200–210–220–230–240–240–230–220–210–220–230 °С. Его корректнее описывать не как профиль с двумя одинаковыми температурными пиками, а как последовательность трех функциональных участков. На первом участке (зоны 1–6) температура ступенчато повышается от 200 до 240 °С и удерживается на плато в двух соседних зонах. На втором участке (зоны 7–9) уставка снижается до 210 °С. На третьем участке (зоны 10–11) она вновь повышается до 230 °С перед выходом расплава и формованием стренги.

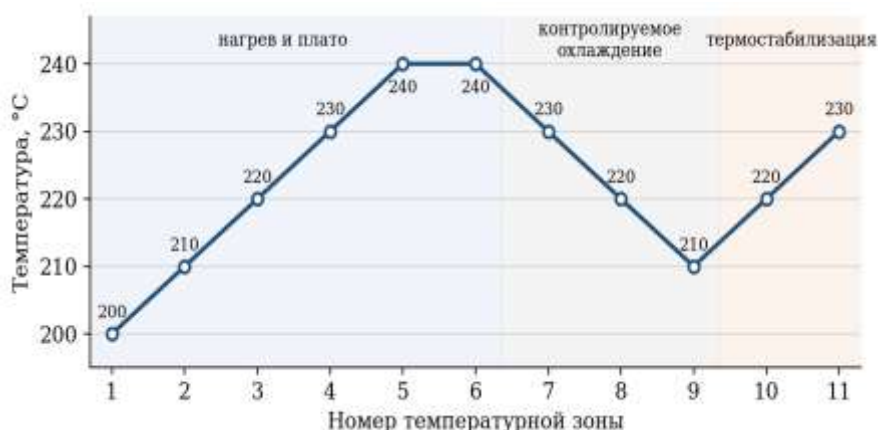


Рис. 1. Температурный профиль двухшнекового компаундирования по 11 зонам.

Fig. 1. Eleven-zone temperature profile for twin-screw compounding.

Температурный размах профиля составляет 40 °С. Плато 240 °С создает участок наиболее интенсивной пластикации и смачивания наполнителя, однако само по себе не доказывает качество межфазного контакта. Последующее снижение уставок ограничивает длительность пребывания матрицы при максимальной температуре и повышает устойчивость стренги к вытяжке. Конечный подъем на 20 °С – от 210 до 230 °С – компенсирует охлаждение перед формирующим участком и способствует стабильности выхода. Эта интерпретация является технологической гипотезой, которую в дальнейшем следует проверить по температуре расплава, крутящему моменту и времени пребывания, а не только по уставкам нагревателей.

Рассчитанная активная длина 1,32 м при $L/D = 44$ указывает на протяженный рабочий участок, пригодный для разнесения операций подачи, плавления, диспергирования и стабилизации. Окружная скорость 0,346 м/с характеризует заданную интенсивность движения поверхности шнека, но не равна локальной скорости сдвига: последняя зависит от зазоров, глубины канала, заполнения и конфигурации элементов. Поэтому перенос режима на экструдер другого диаметра только по совпадению 220 об/мин некорректен. Для масштабирования следует сохранять не отдельную частоту вращения, а совокупность удельной производительности, степени заполнения, удельной механической энергии и времени пребывания.

Давление 1,0 МПа и нагрузка привода 70 % образуют рабочие ориентиры для данного оборудования. Рост этих величин при неизменной подаче может свидетельствовать об увеличении вязкости, уплотнении наполнителя или ограничении проходного сечения; падение – о недозагрузке, проскальзывании либо изменении реологии вследствие влаги и термодеструкции. В производственной карте эти параметры целесообразно регистрировать не единичными значениями, а временными рядами с допустимыми коридорами и тревогами по скорости изменения.

Рецептурный анализ показывает принципиальное различие относительного содержания функциональной добавки. В варианте А на 1 кг волокна приходится 0,20 кг ПЭ-г-МА, в варианте Б – 0,40 кг. Поэтому возможное изменение межфазного взаимодействия нельзя приписывать только переходу от 5 к 10 % волокна. Для реакционноспособных малеинизированных добавок в смесях с PETG описано улучшение совместимости за счет взаимодействия с концевыми группами полиэфира [13]. Однако исследование [13] относится к системе PETG/EVA-г-МА, а не к углеродному наполнителю. Без ИК-спектроскопии, реологии и микроскопии утверждать образование ковалентного «моста» в рассматриваемом PETG/ПЭ-г-МА/углеродном волокне нельзя. В данной работе ПЭ-г-МА корректно обозначен как технологический совместитель, а механизм его действия оставлен проверяемой гипотезой.

Дисперсность измельченного PETG 50-150 мкм сближает характер подачи матрицы и мелкодисперсной функциональной добавки, но одновременно повышает удельную поверхность и риск повторного увлажнения. Удаление пыли снижает сегрегацию и нестабильность дозирования. Измерение угла естественного откоса полезно для оперативной оценки сыпучести, однако не описывает динамику смеси при вибрации и длительном хранении. Для промышленной валидации его следует дополнить насыпной плотностью, коэффициентом Хауснера и проверкой массовой подачи за фиксированный интервал.

Высокая скорость гранулятора использовалась для интенсивной вытяжки стренги перед резкой. Такое воздействие способно ориентировать часть коротких волокон вдоль продольной оси потока, однако степень ориентации в настоящей работе не измерялась. Слишком высокая вытяжка может одновременно уменьшать диаметр стренги, увеличивать разброс гранул и создавать дополнительные напряжения. Поэтому частоту 1400 об/мин следует связывать с диаметром стренги, скоростью выхода и стабильностью гранулирования, а не рассматривать как универсальное оптимальное значение.

Таблица 3
Расчетные характеристики технологического окна.

Table 3

Calculated characteristics of the process window.

Характеристика	Расчетное значение	Интерпретация
Активная длина шнека	1,32 м	протяженный участок пластикация и смешения
Окружная скорость шнека	0,346 м/с	масштаб интенсивности движения поверхности
Диапазон уставок	200–240 °C	температурный размах 40 °C
Максимальное плато	240 °C; зоны 5–6	зона интенсивной пластикация
Локальный минимум	210 °C; зона 9	подготовка расплава к стабилизации
Конечный подъем	+20 °C	210 → 230 °C перед формованием
PETG/волокно	8,8 и 18,6	разная нагрузка наполнителя на матрицу
ПЭ-г-МА/волокно	0,20 и 0,40	двукратное различие относительной дозировки

Сведение операций в карту критических параметров показывает, что итоговая печатаемость не может быть обеспечена одной уставкой температуры расплава. Дефект, возникший при сушке или дозировании, может проявиться позднее – в виде пульсации стренги, нестабильного диаметра нити, пористости и разброса свойств печатной детали. Поэтому контроль должен сопровождать материальный поток от входной партии PETG до герметичной упаковки гранулята.

Таблица 4

Карта критических параметров процесса и контрольных признаков.

Table 4

Map of critical process parameters and control indicators.

Стадия	Критический параметр	Риск отклонения	Контрольный признак
Сушка PETG	65 °C; 3 ч; защита от повторного увлажнения	гидролиз и изменение вязкости	масса до/после; влагосодержание при валидации
Измельчение и рассев	50–150 мкм; удаление пыли	сегрегация и нестабильная подача	гранулометрический состав; пылевая доля
Предсмешение	время и интенсивность	локальная неоднородность состава	оптический скрининг; пробы из разных точек
Дозирование	40 об/мин и стабильный расход	колебания массовых долей	массовая подача за интервал; угол откоса
Компаундирование	220 об/мин; нагрузка 70 %	недосмешение или перегрев	нагрузка/крутящий момент во времени
Тепловой профиль	200–240–210–230 °C	неполное плавление или деградация	температура расплава; давление 1,0 МПа
Вытяжка и грануляция	1400 об/мин; стабильная стренга	разброс геометрии и ориентации	диаметр стренги; длина/масса гранул
Финишная сушка	65 °C; 3 ч	увлажнение перед формованием	влагосодержание и герметичность упаковки

Опытная партия была переработана в лабораторный филамент и использована для печати на FFF-принтере открытого типа. Производственная проба подтвердила технологическую возможность печати без обязательной закрытой термокамеры. Этот результат относится к печатаемости материала в проверенном режиме и не означает автоматической пригодности для любых принтеров, сопел и геометрий детали. В опубликованных исследованиях влияние температуры сопла, высоты слоя и ориентации раstra сохранялось и для углеродонаполненного PETG [10, 12]; следовательно, окно компаундирования должно быть согласовано с отдельным окном печати.

Для филамента из опытной партии в производственных протоколах указан диапазон 3,5–4,0 ГПа. Такая размерность соответствует модулю упругости при изгибе. Употребление термина «прочность при изгибе» для этого диапазона некорректно, поскольку предел прочности выражают как напряжение, обычно в мегапаскалях. Исправление терминологии принципиально: модуль характеризует сопротивление упругой деформации, но не задает напряжение разрушения и не позволяет напрямую обосновать применение в силовых деталях.

Полученный диапазон следует рассматривать как скрининговое подтверждение уровня жесткости, а не как доказанный эффект конкретной рецептуры. В исходном массиве отсутствуют индивидуальные значения, число повторов, геометрия образцов, направление печати и полный протокол испытания. По этой причине не рассчитывали среднее, стандартное отклонение и доверительный интервал, а также не сопоставляли варианты А и Б. Такой подход исключает псевдоточность и задает требования к следующему этапу исследований.

Литературные данные подтверждают необходимость такого ограничения. В системе PETG/короткое углеродное волокно механический эффект зависит от межфазной адгезии и пористости [7, 8], а увеличение массовой доли наполнителя может сопровождаться ростом числа дефектов [11]. Значит, оптимизация должна искать не максимальную концентрацию волокна, а область, где выигрыш в жесткости не перекрывается ухудшением диспергирования, стабильности нити и межслойного сплавления.

Предлагаемая схема дальнейшей валидации включает двухфакторный план «массовая доля волокна × относительная доля совместителя» с отдельным учетом марки волокна. Для каждой точки необходимо фиксировать влагосодержание, массовую производительность, крутящий момент, давление, температуру расплава и время пребывания. Гранулят и филамент следует характеризовать по показателю текучести или реологической кривой, распределению длины волокна после переработки и микроструктуре срезов. Механические испытания должны включать не менее трех независимо изготовленных серий образцов, заданную ориентацию печати и отдельное определение модуля и прочности при изгибе.

Практический результат работы состоит в том, что режим описан набором связанных параметров, пригодных для регистрации и последующей статистической настройки. Для текущего оборудования базовое окно задается сушкой 65 °C/3 ч, двумя рецептурными точками 88/2/10 и 93/2/5, частотой шнеков 220

об/мин, давлением около 1,0 МПа, нагрузкой около 70 % и трехстадийным профилем 200→240→210→230 °С. Указанные значения не следует механически переносить на другую конфигурацию шнеков или производительность; перенос должен сопровождаться подтверждением реологии, времени пребывания и качества дисперсии.

Выводы

Технологический процесс PETG-компаунда с 5-10 мас. % короткого углеродного волокна формализован как окно взаимосвязанных рецептурных, тепловых и механических параметров. Для двух заданных рецептур массовые отношения PETG/волокно составляют 18,6 и 8,8, а ПЭ-г-МА/волокно – 0,40 и 0,20; поэтому эти рецептуры нельзя интерпретировать как однофакторное сравнение только по содержанию волокна.

При диаметре шнека 30 мм и L/D = 44 активная длина рабочего органа составляет 1,32 м, а окружная скорость при 220 об/мин – 0,346 м/с. Эти показатели дают более корректную основу для сопоставления режимов, чем одна частота вращения, но для масштабирования должны быть дополнены удельной производительностью, механической энергией и временем пребывания.

Температурный профиль по 11 зонам имеет трехстадийный характер: нагрев и плато 200→240 °С, контролируемое снижение до 210 °С и конечная термостабилизация при 230 °С. Температурный размах равен 40 °С, конечный подъем – 20 °С.

Критическими этапами являются первичная и финишная сушка, гранулометрическая подготовка, стабильность дозирования, контроль нагрузки и давления, а также согласование скорости выхода стренги с грануляцией. Карта контрольных признаков позволяет перевести эти операции в систему накопления производственных данных.

Диапазон 3,5–4,0 ГПа следует называть модулем упругости при изгибе. Он подтверждает скрининговый уровень жесткости опытного материала, но не является значением прочности при изгибе и без индивидуальных протоколов не позволяет статистически сравнить рецептуры.

Для доказательства влияния содержания и происхождения волокна необходим факторный эксперимент с контролем относительной доли совместителя, влажности и реологии, анализом микроструктуры и стандартизованными испытаниями. До такой валидации ПЭ-г-МА корректно рассматривать как технологический совместитель с предполагаемым, но не доказанным механизмом межфазного действия.

Список источников

1. Петров П.А., Агзамова Д. Р., Шмакова Н. С. и др. Свойства пластика PETG после 3D-печати по технологии FFF. Часть 1 // Станкоинструмент. 2022. № 1 (26). С. 52 – 59. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.26.1.52.59
2. Петров П.А., Агзамова Д.Р., Шмакова Н.С. и др. Свойства пластика PETG после 3D-печати по технологии FFF. Часть 2 // Станкоинструмент. 2022. № 2 (27). С. 58 – 64. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.27.2.58.64
3. Valvez S., Silva A.P., Reis P.N.B. Optimization of printing parameters to maximize the mechanical properties of 3D-printed PETG-based parts // Polymers. 2022. Vol. 14. No. 13. Art. 2564. DOI: 10.3390/polym14132564
4. Fiorillo C., Ohnmacht H., Reyes P. et al. Quantifying hydrolytic degradation of poly(ethylene terephthalate glycol) under storage conditions and for fused filament fabrication mechanical properties // Polymer Degradation and Stability. 2023. Vol. 217. Art. 110511. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110511
5. Wang C., Huang H., Wang X., Wang Y., Zhu Y. Effect of drying treatment on the physical and mechanical properties of material extrusion-based 3D-printed PETG models // BioResources. 2025. Vol. 20. No. 3. P. 7000 – 7009. DOI: 10.15376/biores.20.3.7000-7009
6. García E., Núñez P.J., Caminero M.A., Chacón J.M., Kamarthi S. Effects of carbon fibre reinforcement on geometric properties of PETG-based filament using FFF additive manufacturing // Composites Part B: Engineering. 2022. Vol. 235. Art. 109766. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109766
7. Mahesh V., Joseph A. S., Mahesh V. et al. Investigation on the mechanical properties of additively manufactured PETG composites reinforced with OMMT nanoclay and carbon fibers // Polymer Composites. 2021. Vol. 42. No. 5. P. 2380 – 2395. DOI: 10.1002/pc.25985
8. Kichloo A. F., Raina A., Haq M. I. U., Wani M. S. Impact of carbon fiber reinforcement on mechanical and tribological behavior of 3D-printed polyethylene terephthalate glycol polymer composites—an experimental investigation // Journal of Materials Engineering and Performance. 2022. Vol. 31. No. 2. P. 1021 – 1038. DOI: 10.1007/s11665-021-06262-6

9. Alarifi I.M. PETG/carbon fiber composites with different structures produced by 3D printing // *Polymer Testing*. 2023. Vol. 120. Art. 107949. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.107949
10. Batista M., Lagomazzini J.M., Rodríguez-Parada M., Vazquez-Martinez J. M. Mechanical and tribological performance of carbon fiber-reinforced PETG for FFF applications // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 23. Art. 12701. DOI: 10.3390/app132312701
11. Janković M., Balać I., Popović M., Pjević M., Miloš M. Tensile strength and stiffness properties of additively manufactured PET-G polymer-based composite plates reinforced with different weight fractions of short carbon fibers // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024. Vol. 38. No. 6. P. 2971 – 2977. DOI: 10.1007/s12206-024-0517-y
12. Economides A.L., Islam M.N., Baxevanakis K.P. Additively manufactured carbon fibre PETG composites: effect of print parameters on mechanical properties // *Polymers*. 2024. Vol. 16. No. 23. Art. 3336. DOI: 10.3390/polym16233336
13. Hwang S.W., Ryu H.C., Kim S.W., Park H.Y., Seo K.H. Grafting maleic anhydride onto EVA and effect on the physical and rheological properties of PETG/EVA-g-MAH blends // *Journal of Applied Polymer Science*. 2012. Vol. 125. No. 4. P. 2732 – 2739. DOI: 10.1002/app.36592

References

1. Petrov P.A., Agzamova D.R., Shmakova N.S. et al. Properties of PETG plastic after 3D printing using FFF technology. Part 1. Machine tools. 2022. No. 1 (26). P. 52 – 59. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.26.1.52.59
2. Petrov P.A., Agzamova D.R., Shmakova N.S. etc. Properties of PETG plastic after 3D printing using FFF technology. Part 2. Machine tools. 2022. No. 2 (27). P. 58 – 64. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.27.2.58.64
3. Valvez S., Silva A.P., Reis P.N.B. Optimization of printing parameters to maximize the mechanical properties of 3D-printed PETG-based parts. *Polymers*. 2022. Vol. 14. No. 13. Art. 2564. DOI: 10.3390/polym14132564
4. Fiorillo C., Ohnmacht H., Reyes P. et al. Quantifying hydrolytic degradation of poly(ethylene terephthalate glycol) under storage conditions and for fused filament fabrication mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 217. Art. 110511. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110511
5. Wang C., Huang H., Wang X., Wang Y., Zhu Y. Effect of drying treatment on the physical and mechanical properties of material extrusion-based 3D-printed PETG models. *BioResources*. 2025. Vol. 20. No. 3. P. 7000 – 7009. DOI: 10.15376/biores.20.3.7000-7009
6. García E., Núñez P.J., Caminero M.A., Chacón J.M., Kamarthi S. Effects of carbon fiber reinforcement on geometric properties of PETG-based filament using FFF additive manufacturing. *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 235. Art. 109766. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109766
7. Mahesh V., Joseph A. S., Mahesh V. et al. Investigation on the mechanical properties of additively manufactured PETG composites reinforced with OMMT nanoclay and carbon fibers. *Polymer Composites*. 2021. Vol. 42. No. 5. P. 2380 – 2395. DOI: 10.1002/pc.25985
8. Kichloo A.F., Raina A., Haq M. I. , Wani M.S. Impact of carbon fiber reinforcement on mechanical and tribological behavior of 3D-printed polyethylene terephthalate glycol polymer composites—an experimental investigation. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 31. No. 2. P. 1021 – 1038. DOI: 10.1007/s11665-021-06262-6
9. Alarifi I.M. PETG/carbon fiber composites with different structures produced by 3D printing. *Polymer Testing*. 2023. Vol. 120. Art. 107949. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.107949
10. Batista M., Lagomazzini J.M., Rodríguez-Parada M., Vazquez-Martinez J.M. Mechanical and tribological performance of carbon fiber-reinforced PETG for FFF applications. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 23. Art. 12701. DOI: 10.3390/app132312701
11. Janković M., Balać I., Popović M., Pjević M., Miloš M. Tensile strength and stiffness properties of additively manufactured PET-G polymer-based composite plates reinforced with different weight fractions of short carbon fibers. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024. Vol. 38. No. 6. P. 2971 – 2977. DOI: 10.1007/s12206-024-0517-y
12. Economides A.L., Islam M.N., Baxevanakis K.P. Additively manufactured carbon fiber PETG composites: effect of print parameters on mechanical properties. *Polymers*. 2024. Vol. 16. No. 23. Art. 3336. DOI: 10.3390/polym16233336
13. Hwang S.W., Ryu H.C., Kim S.W., Park H.Y., Seo K.H. Grafting maleic anhydride onto EVA and effect on the physical and rheological properties of PETG/EVA-g-MAH blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012. Vol. 125. No. 4. P. 2732 – 2739. DOI: 10.1002/app.36592

Информация об авторе

Илюхин Д.А., начальник производства ООО «Эргопластика»; Рязанский государственный радиотехнический университет, 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, production@ergoplasika.ru

© Илюхин Д.А., 2026

Information about the author

Ilyukhin D.A., Head of Production, Ergoplasika LLC; Ryazan State Radio Technical University, 390005, Ryazan, Gagarin St., 59/1, production@ergoplasika.ru

© Ilyukhin D.A., 2026