

Научная статья

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-82-91

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ СТЕКЛОВОЛОКНИСТЫХ И ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ НАМОТКЕ

Д.А. Мельников¹, А.Ю. Албагачиев², А.В. Славин¹, А.А. Рыбин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук», Москва, Россия; info@imash.ru

Аннотация. Исследовано влияние вибрационного воздействия на оправку при производстве стеклопластиковых труб методом непрерывной намотки. Рассмотрены механизмы снижения пористости, связанные с деаэрацией, улучшением смачивания наполнителя и виброуплотнением структуры. Экспериментально установлено влияние частоты и амплитуды колебаний на объемную долю пор. Максимальное снижение пористости составило 69,8 % при частоте 100 Гц и амплитуде 0,4 мм. Разработана регрессионная модель для прогнозирования пористости и оптимизации параметров процесса.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, стеклопластик, трубы, непрерывная намотка, моделирование, вибрационное воздействие

Для цитирования: Мельников Д.А., Албагачиев А.Ю., Славин А.В., Рыбин А.А. Исследование влияния параметров вибрационного воздействия на процессы структурообразования стеклопластика на основе стекловолоконных и дисперсных наполнителей при непрерывной намотке // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 82–91. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-82-91.

Scientific article

THE INFLUENCE OF VIBRATION PARAMETERS ON THE STRUCTURE FORMATION PROCESSES IN FIBERGLASS BASED ON GLASS FIBER AND DISPERSED FILLERS DURING CONTINUOUS WINDING

D.A. Melnikov¹, A.Yu. Albagachiev², A.V. Slavin¹, A.A. Rybin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; info@imash.ru

Abstract. This article examines the influence of vibration on a mandrel during the production of fiberglass pipes using the continuous winding method. Porosity reduction mechanisms associated with deaeration, improved filler wetting, and vibration compaction of the structure are considered. The influence of vibration frequency and amplitude on the pore volume fraction was experimentally determined. The maximum porosity reduction was 69,8 % at a frequency of 100 Hz and an amplitude of 0,4 mm. A regression model for predicting porosity and optimizing process parameters was developed.

Keywords: polymer composite materials, fiberglass, pipes, continuous winding, modeling, vibration impact

For citation: Melnikov D.A., Albagachiev A.Yu., Slavin A.V., Rybin A.A. The influence of vibration parameters on the structure formation processes in fiberglass based on glass fiber and dispersed fillers during continuous winding. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 82–91. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-82-91.

Введение

Стеклопластиковые трубы (СПТ), представляющие собой композиционные конструкции на основе стекловолоконных армирующих наполнителей и полимерной матрицы, созданы как ответ на острую потребность в коррозионностойких и долговечных трубопроводных системах [1, 2]. Их промышленное становление неразрывно связано с развитием химии термореактивных смол (прежде всего, эпоксидных и полиэфирных) и технологий переработки стекловолокна в середине XX в. Пионером выступила американская компания Амегон, разработавшая в 1960-х гг. первые напорные трубы для нефтедобычи, способные работать при давлении до 30 МПа в агрессивных средах, содержащих сероводород и солевые растворы. Эта технологическая революция позволила решить проблему катастрофической коррозии стальных трубопроводов, особенно актуальную для транспортировки агрессивных сред [3]. К 1980-м гг. СПТ перешли из категории уникальных решений в разряд стандартизированных изделий, чему способствовала разработка международных (ISO, ASTM) и национальных (ГОСТ) стандартов, регламентирующих их производство и применение.

Классификация СПТ отражает их технологическое разнообразие, конструктивную сложность и функциональное назначение, технология производства определяет структуру и свойства.

Непрерывная (филаментная) намотка (Filament Winding) является доминирующей технологией производства напорных труб средних и больших номинальных диаметров (50–4000 мм), при которой непрерывные нити стекловолокна и кварцевого песка, пропитанные связующим, укладываются на вращающуюся оправку (мандрил) под заданным углом и натяжением [4].

Изготовленные методом непрерывной намотки СПТ преимущественно применяются в жилищно-коммунальном хозяйстве в качестве безнапорной и напорной хозяйственно-бытовой, ливневой канализации, трубопроводов водоснабжения, систем охлаждения и др.

Полимерные композиционные материалы, используемые в СПТ, не подвержены электрохимической коррозии, так как не содержат свободных электронов, обеспечивающих протекание окислительно-восстановительных реакций на их поверхности. Это устраняет необходимость в катодной защите и других способах предотвращения коррозии. Полимерная матрица композиционного материала химически инертна к большинству агрессивных сред (H_2S , CO_2 , кислоты, щелочи, соли). Это обусловлено высокой химической стойкостью полимера и отсутствием металлических включений, которые могли бы подвергаться химической деградации. Данное свойство предоставляет существенное преимущество по сравнению с металлическими материалами [5–7].

Повышенное значение объемной доли пор (пористости) является распространенной причиной возникновения дефектов СПТ. Высокая пористость в СПТ возникает вследствие неполной пропитки плотных пучков волокон, захвата воздуха между слоями нитей или на границе слоев с разным составом (особенно между структурным и наполненным песком слоями), испарения летучих компонентов связующего и др.

Объемная доля пор определяется по наличию в материале дискретных, замкнутых или взаимосвязанных полостей, заполненных газообразной фазой [8]. В контексте производства СПТ методом непрерывной намотки пористость оказывает критическое

влияние на эксплуатационные характеристики изделий, обуславливая снижение плотности материала на 3–15 % и, как следствие, ухудшение механических свойств, водостойкости, химической стойкости и долговечности. Генезис пор является сложным и многофакторным процессом, определяемым комплексным взаимодействием реологических, термохимических и динамических факторов, характерных для процесса непрерывной намотки [9, 10].

Традиционные методы борьбы с пористостью [11] при непрерывной намотке (оптимизация вязкости связующего, точный контроль натяжения и скорости, вакуумная обработка) имеют пределы эффективности и технологические сложности, особенно для наполненных слоев. Это создает предпосылки для поиска и разработки новых физических методов воздействия на процесс формования.

В данной статье предложен принципиально новый подход к решению проблемы пористости в СПТ, основанный на применении вибрационного воздействия на оправку в процессе непрерывной намотки. Вибрационное воздействие позволяет активно управлять процессами деаэрации, смачивания и уплотнения материала, что приводит к значительному снижению пористости и повышению уровня свойств.

Вибрация, характеризуемая определенными уровнями частоты (f) и амплитуды (A), индуцирует в обрабатываемом материале ряд сложных динамических эффектов, которые можно использовать для достижения требуемого результата. Типичные параметры вибрации для полимерных систем находятся в определенном диапазоне: $f = 5\text{--}5000$ Гц (колебаний в секунду), $A = 0,01\text{--}5$ мм (максимальное отклонение от положения равновесия). В указанном диапазоне параметров вибрационное воздействие проявляется через основные механизмы.

Вибрация создает периодически изменяющиеся силы инерции, воздействующие на каждый элемент материала. Эти силы приводят к относительному перемещению компонентов смеси, способствуя микроперемешиванию фаз и разрушению агломератов. Сила инерции прямо пропорциональна массе объекта и его ускорению. Вибрационное воздействие создает переменное ускорение, вызывая колебания силы инерции, что приводит к перемешиванию компонентов с разной плотностью. Это способствует равномерному распределению наполнителя в полимерной матрице композиционных материалов и предотвращает его седиментацию [12].

Интенсивная вибрация в жидких и вязких средах приводит к возникновению акустических течений – конвективных потоков, обусловленных нелинейными эффектами распространения звуковых волн. Эти течения обеспечивают эффективное перемешивание, интенсификацию тепло- и массообмена, а также способствуют дегазации материала. С точки зрения гидродинамики акустические течения возникают из-за поглощения звуковой энергии средой, что приводит к возникновению градиентов давления и, как следствие, к движению жидкости. В полимерных системах акустические течения способствуют удалению пузырьков воздуха, улучшению смачивания волокон наполнителя и равномерному распределению температуры в объеме материала [13].

При совпадении частоты вынужденных колебаний (вибрации) с собственной частотой колебаний элементов структуры материала возникают резонансные явления. Резонанс приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний и, соответственно, к усилению воздействия на микроструктуру. Резонанс возникает, когда энергия, передаваемая системе извне, эффективно накапливается, приводя к значительному увеличению амплитуды колебаний. В композиционных материалах резонансные явления можно использовать для разрушения слабых связей между частицами наполнителя, улучшения его диспергирования и активации процессов отверждения полимерной матрицы.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны СПТ номинальным диаметром 1000 мм по ГОСТ Р 54560–2015 и вырезанные из них образцы, которые получали на установке автоматической резки с водяным охлаждением. Общий вид СПТ приведен на рис. 1.

Для изготовления СПТ методом непрерывной намотки использовали намоточную машину с интегрированным вибромодулем и возможностью поочередного нанесения армирующих непрерывных, рубленых и дисперсных наполнителей, предварительно пропитанных термореактивными связующими, с последующим отверждением в процессе непрерывной намотки.



Рис. 1. Общий вид стеклопластиковой трубы, изготовленной методом непрерывной намотки

Компоненты, использованные для изготовления СПТ, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Компоненты для изготовления стеклопластиковых труб

Материал	Характеристики
Непрерывный стеклоровинг	Стекловолокно марки ECR (600/1200/2400/4800 текс)
Рубленый стеклоровинг	Стекловолокно марки E (1200/2400 текс)
Кварцевый песок	Марка ВС-050-1 (фракция размером 0,2–0,8 мм, содержание $\text{SiO}_2 > 99\%$)
Смола	Полиэфирная ортофталевая смола марки ПН-1
Инициатор	Дикумилпероксид (1,5 % от массы смолы)
Ускоритель	6%-ный раствор октоата кобальта (0,5 % от массы смолы)

Стенка СПТ представляла собой трехслойную конструкцию, в которой слой кварцевого песка с рубленым ровингом располагается между армирующими слоями непрерывного стеклянного ровинга. Данная конструкция стенки трубы позволяет распределять внешние и внутренние нагрузки без разрушения среднего слоя с кварцевым песком. На рис. 2 представлено схематическое изображение структуры стенки СПТ.

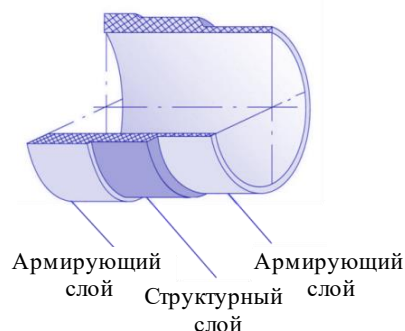


Рис. 2. Структура стенки стеклопластиковой трубы

Вибрационное воздействие осуществляли синусоидальным сигналом как наиболее предсказуемым и широко применяемым в промышленности. Для создания контролируемого радиального вибрационного воздействия на оправку был использован вибромодуль на основе электродинамического вибровозбудителя. Электродинамический вибровозбудитель обеспечивает высокую точность управления амплитудой и частотой вибрации. Радиальное направление вибрации позволяет равномерно воздействовать на всю поверхность зоны подачи сырья [14].

Корпус (магнитная система) вибровозбудителя закреплен на жесткой консоли, неподвижно связанной со станиной станка. Подвижный шток вибратора соединен с валом планшайбы через сферический шарнирный подшипник. Данная схема обеспечивает передачу колебаний строго вдоль оси вращения оправки, одновременно компенсируя возможные несоосности и позволяя планшайбе свободно вращаться.

На основе результатов теоретического анализа и численного моделирования выбраны варьируемые параметры вибрационного воздействия [15, 16]. Исследованный диапазон частоты вибрации (50, 100 и 150 Гц) охватывает зону резонансной коалесценции газовых пузырей (80–150 Гц) и оптимальный диапазон 80–120 Гц, полученный по результатам моделирования. Исследованный диапазон амплитуды вибрации (0,2; 0,4 и 0,6 мм) соответствует зоне эффективного уплотнения и дегазации (0,3–0,6 мм) без риска сепарации наполнителя.

Фактические параметры вибрации измеряли в реальном времени системой мониторинга Polytec OFV-505.

Параллельно изготовлена контрольная серия образцов по идентичной технологии, но без применения вибрационного воздействия. На рис. 3 приведены фотографии образцов.

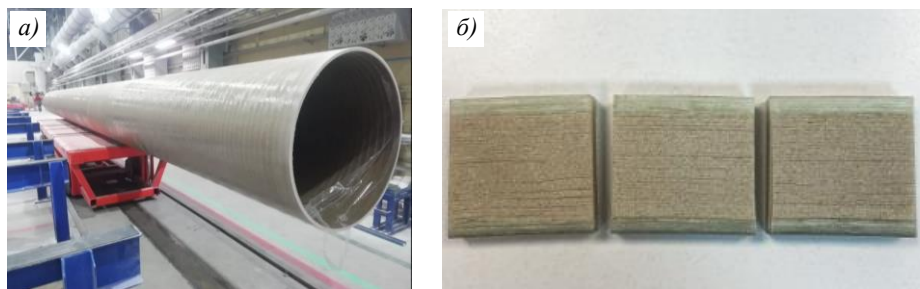


Рис. 3. Труба номинальным диаметром 1000 мм (а) и вырезанные из нее образцы (б)

Для минимизации количества экспериментов при сохранении репрезентативности данных применен метод планирования эксперимента. Выбран полный факторный эксперимент (Full Factorial Experiment) для двух факторов (частота и амплитуда) на трех уровнях каждого. Таким образом, общее количество уникальных условий эксперимента включало девять экспериментальных серий и одну контрольную серию (без вибрации).

Для обеспечения статистической значимости в каждой серии изготовлено пять идентичных образцов-сегментов труб длиной 500 мм. Общее количество образцов составило 50.

Основным выходным параметром (откликом) для статистического анализа выбрана объемная доля пор в структурном слое как наиболее критичный параметр, на который направлено вибрационное воздействие.

Пористость определяли по ГОСТ Р 56679–2015 (метод А) и верифицировали методом микроскопии.

Результаты и обсуждение

Матрица планирования эксперимента и основные результаты, полученные при определении объемной доли пор образцов, представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента и объемная доля пор структурного слоя

Условный номер серии	Частота f , Гц	Амплитуда A , мм	Объемная доля пор, % (средняя±стандартное отклонение)	Снижение пористости относительно контроля, %
1 (контроль)	0	0	9,31±0,45	—
2	50	0,2	6,84±0,38	26,5
3	50	0,4	5,12±0,31	45,0
4	50	0,6	4,95±0,29	46,8
5	100	0,2	5,88±0,35	36,8
6	100	0,4	2,81±0,21	69,8
7	100	0,6	3,05±0,24	67,2
8	150	0,2	5,01±0,30	46,2
9	150	0,4	3,42±0,26	63,3
10	150	0,6	3,98±0,28	57,3

Анализ данных табл. 2 показывает, что все исследованные режимы вибрации обеспечивают статистически значимое снижение пористости по сравнению с контролем. Наименьшее значение объемной доли пор (2,81 %) достигнуто при частоте 100 Гц и амплитуде 0,4 мм, что соответствует максимальному снижению на 69,8 %.

При этом наблюдается немонотонная зависимость пористости от амплитуды: при частотах 100 и 150 Гц увеличение амплитуды с 0,4 до 0,6 мм приводит к повышению пористости (с 2,81 до 3,05 % и с 3,42 до 3,98 % соответственно). Данный эффект объясняется тем, что наряду с полезным резонансным возбуждением газовых пузырьков в диапазоне частот 80–150 Гц, способствующим их коалесценции и удалению, чрезмерное повышение частоты колебаний и/или амплитуды вызывает возбуждение резонансных колебаний самой оправки и приводит к дополнительному захвату воздуха в межслойном пространстве.

Для статистической оценки значимости влияния факторов проведен двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA), результаты которого представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа для объемной доли пор

Источник вариации	Сумма квадратов SS	Степени свободы df	Средний квадрат MS	F -значение	p -значение
Модель	145,42	5	29,084	312,45	<0,001
Частота f	28,15	2	14,075	151,21	
Амплитуда A	95,87	2	47,935	514,89	
Взаимодействие $f \times A$	21,40	1	21,400	229,88	
Ошибка	4,10	44	0,093	—	—
Итого	149,52	49	—		

Дисперсионный анализ (табл. 3) подтверждает, что как частота, так и амплитуда вибрации, а также их взаимодействие оказывают статистически значимое влияние на пористость (p -значение <0,001 для всех эффектов). Наибольший вклад вносит амплитуда (сумма квадратов $SS = 95,87$), что указывает на ее основное влияние на процесс уплотнения. Значимость взаимодействия $f \times A$ свидетельствует о том, что эффективность вибрации не является аддитивной – оптимальное сочетание параметров должно выбираться совместно.

Уровень p -значения <0,001 для модели в целом свидетельствует о ее высокой адекватности и способности статистически значимо описывать экспериментальные данные. Оба фактора (частота и амплитуда) оказывают статистически значимое влияние на пористость (p -значение <0,001). Взаимодействие $f \times A$ также является статистически значимым (p -значение <0,001), что указывает на взаимозависимое влияние частоты и амплитуды на конечный результат.

На основе данных регрессионного анализа получено уравнение регрессии, связывающее параметры вибрации с пористостью (P , %):

$$P = 9,31 - 0,0215f - 10,25A + 0,065fA + 0,0001f^2 + 7,12A^2 \quad (R^2 = 0,973).$$

Коэффициенты уравнения вычислены по экспериментальным данным (табл. 2) следующим образом. Свободный член (9,31) соответствует средней пористости контрольных образцов (без вибрации). Коэффициенты при линейных членах ($-0,0215$ и $-10,25$) характеризуют скорость снижения пористости с повышением частоты и амплитуды соответственно. Их отрицательные знаки указывают на то, что увеличение обоих параметров в исследованном диапазоне способствует уплотнению структуры. Коэффициент при члене взаимодействия ($+0,065$) отражает синергетический эффект: эффективность вибрации зависит от совместного действия частоты и амплитуды, а не является простой суммой их отдельных вкладов. Положительные коэффициенты при квадратичных членах ($+0,0001$ и $+7,12$) описывают нелинейность зависимости и существование оптимальной области параметров – при выходе за пределы этой области дальнейшее увеличение частоты или амплитуды приводит к повышению пористости.

Полученное уравнение описывает экспериментальные данные (коэффициент детерминации $R^2 = 0,973$) и позволяет прогнозировать пористость в исследованном диапазоне параметров.

На рис. 4 представлена столбчатая диаграмма, визуализирующая эффективность вибрационного воздействия в виде снижения пористости (в процентах относительно контроля) для каждой экспериментальной серии. Данное графическое представление дополняет табличные данные, наглядно демонстрируя, что максимальный эффект достигается при частоте 100 Гц и амплитуде 0,4 мм, а также позволяет легко сравнивать режимы между собой.

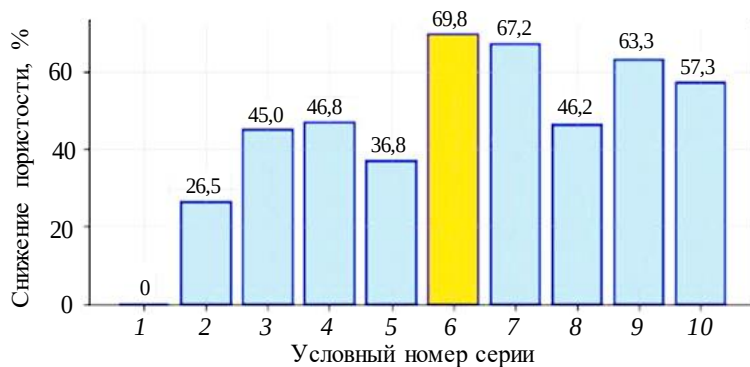


Рис. 4. Влияние вибрационного воздействия на снижение объемной доли пор при проведении десяти экспериментальных серий (см. табл. 2)

Поверхность отклика (рис. 5) показывает непрерывную зависимость пористости от частоты и амплитуды. На ней четко выделяется область минимума в районе $f = 100$ Гц, $A = 0,4$ мм, а также заметно повышение пористости при значении амплитуды $>0,5$ мм, что согласуется с ранее сделанным выводом о негативном влиянии избыточной вибрации.

На рис. 6 представлены микрофотографии поперечного сечения образцов, демонстрирующие разительный контраст между контрольным образцом и образцом, изготовленным с применением вибрации при оптимальных параметрах (частота 100 Гц, амплитуда 0,4 мм).

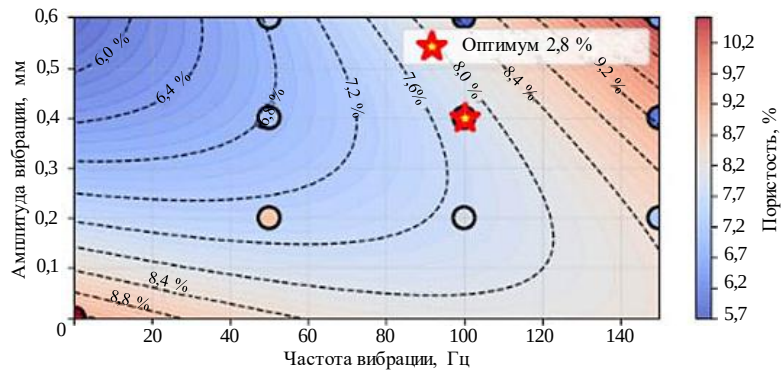


Рис. 5. Поверхность отклика

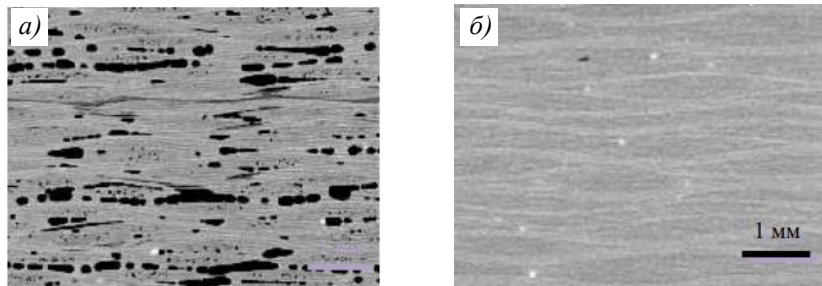


Рис. 6. Микрофотографии образцов, полученных без вибрационного воздействия (а) и с применением вибрации при частоте 100 Гц и амплитуде 0,4 мм (б)

Для контрольного образца (без вибрации) характерна высокая концентрация пор различных размеров (от мелких до крупных), неравномерно распределенных по объему. Наблюдаются протяженные поровые каналы, расположенные вдоль волокон и в межслойных зонах, которые являются потенциальными концентраторами напряжений и каналами проникновения рабочих сред.

Для образца, обработанного вибрацией, наблюдается значительное уплотнение структуры. Количество и размер пор радикально снижены. Оставшиеся поры, как правило, изолированы и имеют малый размер, что не оказывает критического влияния на механические и барьерные свойства материала.

Результаты микроскопии коррелируют с данными, полученными методом определения пористости по ГОСТ Р 56679–2015 (метод А), и визуально подтверждают эффективность вибрационного воздействия для снижения порообразования.

Заключения

По результатам изготовления образцов и исследования пористости установлено, что вибромодуль обеспечивает создание контролируемого вибрационного воздействия на оправку в заданных диапазонах частот и амплитуд. Экспериментально подтверждена высокая эффективность вибрационного воздействия на оправку для снижения пористости СПТ. Максимальное снижение пористости (на 69,8 %) достигнуто при $f = 100$ Гц и $A = 0,4$ мм. Установлен синергетический характер влияния частоты и амплитуды вибрации на процесс структурообразования. Статистически значимое взаимодействие факторов (p -значение $< 0,001$) подтверждает необходимость комплексного подхода к выбору параметров. Разработана регрессионная модель с высокой предсказательной способностью ($R^2 = 0,973$), позволяющая оптимизировать параметры вибрации для различных типоразмеров труб и рецептур материалов. Подтверждены физические механизмы влияния вибрации: вибрационная тиксотропия, резонансная коалесценция газовых пузырей, улучшение смачивания наполнителя и виброуплотнение структуры.

Список источников

1. Аминов Л.А. Использование стеклопластиковых труб для совершенствования трубопроводной системы // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2022. № 12. С. 15–18.
2. Иванов С.В. Стеклопластик – композиционный материал для труб // Трубопроводы и экология. 2001. № 2. С. 7.
3. Современные композиционные материалы / под ред. Л. Браутиана, Р. Крока. М.: Мир, 1970. 672 с.
4. Крысин В.Н., Крысин М.В. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
5. Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Ильченко С.И. и др. Конструкционные углепластики с повышенной проводимостью // Авиационные материалы и технологии. 2004. № 2. С. 25–36.
6. Вешкин Е.А., Славин А.В., Постнова М.В., Апалькова А.В. Роль температурно-временных условий отверждения в формировании свойств однонаправленного и равнопрочного углепластиков // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 2 (79). С. 59–71. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.
7. Начаркина А.В., Валуева М.И., Зеленина И.В., Шошева А.Л. Высокотемпературные углепластики на основе бисмалеинимидных связующих // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 4 (77). С. 43–61. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
8. Прокопенков В.Г., Морозов Ю.А., Петров А.И. Особенности определения плотности стеклопластиков на основе полых волокон // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 3 (80). С. 83–95. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-83-95.
9. Bolotin V.V. Delaminations in composite structures: Its origin, buckling, growth and stability // Composites. Part B: Engineering. 1996. Vol. 27. Is. 2. P. 129–145. DOI: 10.1016/1359-8368(96)00035-6.
10. Кушнир С.Я., Горковенко А.И., Гербер А.Д., Игнатко В.М. Прочностные характеристики стеклопластиковых труб и потеря устойчивости трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2003. № 3 (39). С. 55–56.
11. Гуляев И.Н., Клименко О.Н., Лонский С.Л., Славин А.В., Черфас Л.В. Определение состава и структуры полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 4 (81). С. 32–47. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-32-47.
12. Адегова Л.А., Бобрышева М.В., Щербинина А.Е. Исследование потери устойчивости цилиндрической оболочки, выполненной из композиционного материала // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 3 (79). С. 330–350.
13. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М: Машиностроение, 1994. 381 с.
14. Цыплаков О.Г. Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов: в 2 ч. Пермь: Пермское книжное издательство, 1985. Ч. 2. 274 с.
15. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
16. Khoun L., Centea T., Hubert P. Characterization methodology of thermoset resins for the processing of composite materials – case study: CYCOM 890RTM epoxy resin // Journal of Composite Material. 2010. Vol. 44. P. 1397–1415.

References

1. Aminov L.A. Use of Fiberglass Pipes to Improve the Pipeline System. *Aktualnye problemy voyenno-nauchnykh issledovaniy*, 2022, no. 12, pp. 15–18.
2. Ivanov S.V. Fiberglass – a Composite Material for Pipes. *Truboprovody i ekologiya*, 2001, no. 2, p. 7.
3. *Modern Composite Materials*. Ed L. Brautian, R. Krok. Moscow: Mir, 1970, 672 p.
4. Krysin V.N., Krysin M.V. *Technological Processes of Molding, Winding, and Gluing Structures*. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 240 p.

5. Kablov E.N., Gunyaev G.M., Ilchenko S.I. et al. Structural carbon fiber reinforced plastics with increased conductivity. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2004, no. 2, pp. 25–36.
6. Veshkin E.A., Slavin A.V., Postnova M.V., Apalkova A.V. The role of temperature-time curing conditions in the formation of unidirectional and equally strong carbon fiber plastics properties. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), pp. 59–71. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 19, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.
7. Nacharkina A.V., Valueva M.I., Zelenina I.V., Shosheva A.L. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on bismaleinimide binders. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 43–61. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 19, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
8. Prokopenkov V.G., Morozov Yu.A., Petrov A.I. Regarding density determination of glass reinforced plastics based on hollow fibers. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 83–95. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 19, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-83-95.
9. Bolotin V.V. Delaminations in composite structures: Its origin, buckling, growth and stability. *Composites. Part B: Engineering*, 1996, vol. 27, is. 2, pp. 129–145. DOI: 10.1016/1359-8368(96)00035-6.
10. Kushnir S. Ya., Gorkovenko A. I., Gerber A. D., Ignatko V. M. Strength characteristics of fiberglass pipes and loss of pipeline stability. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy*, 2003, no. 3 (39), pp. 55–56.
11. Gulyaev I.N., Klimenko O.N., Lonskii S.L., Slavin A.V., Cherfas L.V. Determination of the composition and structure of polymer composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 4 (81), pp. 32–47. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 19, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-32-47.
12. Adeгова L.A., Bobrysheva M.V., Shcherbinina A.E. Study of the Loss of Buckling of a Cylindrical Shell Made of Composite Material. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 2021, vol. 18, no. 3 (79), pp. 330–350.
13. Lizin V.T., Pyatkin V.A. Design of Thin-Walled Structures. Moscow: Mashinostroenie, 1994. 381 p.
14. Tsyplakov O.G. *Scientific Foundations of Composite-Fiber Materials Technology*: in 2 parts. Perm: Perm Book Publ. House, 1985, part 2, 274 p.
15. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. *Planning an Experiment in the Search for Optimal Conditions*. Moscow: Nauka, 1976, 279 p.
16. Khoun L., Centea T., Hubert P. Characterization methodology of thermoset resins for the processing of composite materials – case study: CYCOM 890RTM epoxy resin. *Journal of Composite Material*, 2010, vol. 44, pp. 1397–1415.

Информация об авторах

Мельников Денис Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Албагачиев Али Юсупович, заведующий отделом, д.т.н., ИМАШ РАН, info@imash.ru

Славин Андрей Вячеславович, начальник Научно-исследовательского отделения, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Рыбин Александр Александрович, ведущий инженер, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Denis A. Melnikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ali Yu. Albagachiev, Head of Department, Doctor of Sciences (Tech.), IMASH RAN, info@imash.ru

Andrey V. Slavin, Head of Scientific-Research Bureau, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksandr A. Rybin, Leading Engineer, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.06.2026; получена после доработки 29.06.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.07.2026.
The article was submitted 17.06.2026; received in revised form 29.06.2026; approved and accepted for publication after reviewing 02.07.2026.