

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-133-145

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ

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

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. Статья посвящена изготовлению трехслойных стеклопластиковых труб методом непрерывной намотки с использованием низкочастотного вибрационного воздействия на оправку. Обоснован комплекс физических моделей, описывающих влияние параметров вибрации на процессы структурообразования и кинетику отверждения. Показано, что выбор частоты и амплитуды воздействия позволяет кратно снизить остаточную пористость без нарушения однородности композита. Разработанный подход создает научную основу для инженерного проектирования вибрационных модулей и обеспечивает повышение качества, надежности и конкурентоспособности трубной продукции при минимальных дополнительных энергозатратах.

Ключевые слова: стеклопластиковые трубы, намотка, вибрационные технологии, оснастка, тиксотропия, дегазация, пористость

Для цитирования: Мельников Д.А., Албагачиев А.Ю., Рыбин А.А., Славин А.В. Теоретические основы применения вибрационных технологий при изготовлении стеклопластиковых труб // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 133–145. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-133-145.

Scientific article

THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE APPLICATION OF VIBRATION TECHNOLOGIES IN THE MANUFACTURE OF FIBERGLASS PIPES

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

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 is devoted to the production of three-layer fiberglass pipes using continuous winding with low-frequency vibration applied to the mandrel. A set of physical models describing the influence of vibration parameters on structure-formation processes and curing kinetics is substantiated. It is shown that selection frequency and amplitude of vibration allows for a significant reduction in residual porosity without compromising the homogeneity of the composite. The developed approach provides a scientific basis for the engineering design of vibration modules and ensures improved quality, reliability, and competitiveness of pipe products with minimal additional energy consumption.

Keywords: fiberglass pipes, winding, vibration technologies, tooling, thixotropy, degassing, porosity

For citation: Melnikov D.A., Albagachiev A.Yu., Rybin A.A., Slavin A.V. Theoretical foundations of the application of vibration technologies in the manufacture of fiberglass pipes. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 133–145. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-133-145.

Введение

Все более широкое применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в изделиях различных отраслей промышленности ставит задачу разработки новых технологий, обеспечивающих повышенные требования по эксплуатационным характеристикам конструкций из ПКМ [1, 2]. При внедрении новых материалов и технологий должны обеспечиваться необходимые упруго-прочностные характеристики ПКМ, в том числе стойкость материалов к воздействию эксплуатационных факторов, отрицательно влияющих на прочность, герметичность и долговечность использования [3–5]. Это позволит обеспечить более широкое внедрение конструкций из ПКМ в таких отраслях промышленности, как машино- и судостроение, строительство и др.

Стеклопластиковые трубы, изготовленные методом непрерывной намотки (МНН), являются стратегически важным продуктом для модернизации и развития критической промышленной инфраструктуры. В качестве основных преимуществ таких изделий можно выделить следующие:

- высокая коррозионная стойкость – не подвержены ржавчине, электрохимической коррозии, устойчивы к широкому спектру химикатов;
- высокая удельная прочность;
- долговечность – срок службы более 50 лет при правильной эксплуатации;
- низкие гидравлические потери – гладкая внутренняя поверхность;
- диэлектрические свойства;
- экологическая безопасность – инертность, отсутствие выделений.

Основной технологической проблемой изделий является пористость, образующаяся в процессе изготовления стеклопластиковых труб с помощью МНН. Причиной ее возникновения является захват воздуха между слоями волокон и нитями ровинга при намотке, недостаточная пропитка волокна связующим, испарение летучих компонентов связующего, усадка полимера при отверждении, дефекты укладки [6, 7].

Контроль и минимизация пористости являются ключевыми факторами обеспечения надежности, долговечности и конкурентоспособности стеклопластиковых труб, изготовленных МНН [8]. В настоящее время существует острая потребность в новых, технологичных и эффективных способах борьбы с пористостью непосредственно в процессе непрерывной намотки стеклопластиковых труб.

В данной работе представлена технология, позволяющая снизить пористость за счет вибрационного воздействия на оправку в процессе пропитки. Суть метода заключается в приложении контролируемых механических колебаний непосредственно к оправке в процессе намотки и начальной стадии отверждения.

Выполнено исследование закономерностей влияния параметров вибрационного воздействия на процессы структурообразования (дегазацию, смачивание, уплотнение) при непрерывной намотке стеклопластиковых труб и дана теоретическая оценка эффективности данного метода для снижения пористости и улучшения физико-механических свойств.

При оптимизации технологических параметров процесса намотки часто возникает конфликт между различными требованиями к свойствам материала и эффективности процесса. Невозможно одновременно достичь вязкости <300 мПа·с для пропитки и термостойкости >100 °С. Снижение вязкости полимерного связующего для улучшения пропитки обычно приводит к снижению его термостойкости, что ограничивает область

применения стеклопластиковых труб, изготовленных МНН. Снижение пористости в таких трубах с помощью традиционных методов часто связано со значительным увеличением себестоимости продукции, так как требует применения дорогостоящих материалов, внедрения сложных технологических процессов и использования дополнительного оборудования, что увеличивает затраты. В этом случае снижение пористости с 8 до 4 % приведет к увеличению себестоимости продукции на 35–50 %. Поэтому при выборе метода снижения пористости необходимо использовать экономически выгодный вариант технологии вибрационного воздействия, что обеспечит конкурентоспособность продукции.

Материалы и методы

В данной работе предлагается технология, основанная на вибрационном воздействии на оправку, что представляет собой принципиально иной физический подход к решению снижения пористости в стеклопластиковых трубах, изготовленных МНН. Вибрационное воздействие при намотке позволяет активно управлять процессами деаэрации, повышая смачиваемость и уплотнение материала, не прибегая к сложным и дорогостоящим технологиям.

Мощность узла, создающего вибровоздействие, составляет 0,5–3,0 кВт, что значительно ниже энергопотребления при применении традиционных методов, таких как автоклавное формование (40–100 кВт). Такой уровень энергопотребления делает вибрационный метод экономически привлекательным и экологически безопасным. При вибрационном методе энергия колебаний используется для активации процессов деаэрации и повышения смачивания наполнителя, в то время как автоклав требует значительных затрат на электроэнергию для нагрева и поддержания давления.

Вибрационный метод можно интегрировать в существующие установки для намотки, при этом не требуются значительная перестройка оборудования и изменение технологического процесса [9]. Использование вибрационного модуля не предусматривает остановки процесса намотки и позволяет проводить обработку материала в непрерывном режиме. Вибрационный метод обеспечивает также высокую эффективность в снижении пористости в слоях с дисперсным наполнителем, что является особо важным для производства герметичных и прочных стеклопластиковых труб, изготовленных МНН. Вибрационное воздействие обеспечивает снижение эффективной вязкости связующего и облегчает удаление воздуха из межволоконного пространства, что позволяет достичь плотной упаковки композита и снизить пористость.

Результаты и обсуждение

Вибрация при определенной частоте и амплитуде вызывает в обрабатываемом материале ряд динамических эффектов, которые усиливают капиллярный эффект, уменьшают поверхностное натяжение связующего, что может использоваться для более качественной пропитки и снижения пористости. Оптимальные параметры вибрации для полимерных связующих находятся в диапазоне частот 5–5000 Гц при амплитуде 0,01–5 мм. В этом диапазоне вибрационное воздействие обеспечивает баланс между негативным воздействием, приводящим к разрушению структуры, и положительным влиянием на повышение свойств материала изделия.

При вибрации на каждый компонент материала воздействуют периодически изменяющиеся силы инерции. Это приводит к относительному перемещению компонентов смеси, способствуя микроперемешиванию фаз и разрушению агломератов. Согласно науке о динамике, сила инерции прямо пропорциональна массе объекта и его ускорению. Вибрационное воздействие создает переменное ускорение, вызывая колебания

компонентов, что эффективно при перемешивании компонентов с разной плотностью. Применительно к композитным материалам это способствует равномерному распределению наполнителя в виде частиц и волокон в связующем и предотвращает их седиментацию.

Такая вибрация в псевдожидких и вязких средах приводит к возникновению акустических течений – потоков, обусловленных нелинейными эффектами распространения звуковых волн. Это обеспечивает эффективное перемешивание, интенсификацию тепло- и массообмена, а также способствует 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 [10].

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. С точки зрения теории колебаний резонанс возникает, когда энергия, передаваемая системе извне, эффективно накапливается, приводя к значительному увеличению амплитуды колебаний. В композитных материалах резонансные явления могут использоваться для разрушения слабых связей между частицами наполнителя, улучшения его диспергирования и активации процессов кристаллизации полимерной матрицы.

Ключевым параметром, характеризующим интенсивность вибрационного воздействия, является виброскорость, определяемая как

$$v = 2\pi fA, \quad (1)$$

где v – виброскорость, м/с; f – частота вибрации, Гц; A – амплитуда вибрации, м.

Для большинства полимерных систем оптимальная виброскорость находится в диапазоне 0,1–2 м/с. Выбор оптимального значения виброскорости зависит от конкретной задачи, свойств обрабатываемого материала и используемого оборудования. Слишком низкая виброскорость не обеспечит достаточного воздействия на материал, в то время как слишком высокая может привести к его разрушению или нежелательным изменениям структуры. Например, для деаэрации вязких полимерных систем требуется более высокая виброскорость, чем для простого перемешивания компонентов [11].

Анализ успешного применения вибрационного воздействия в различных технологиях переработки материалов позволяет выявить общие принципы и подходы, которые могут быть адаптированы для улучшения качества слоистых полимерных трубных композитов. Приведенные далее прецеденты иллюстрируют эффективность вибрации при решении задач, связанных с уплотнением, деаэрацией, улучшением смачивания и контролем микроструктуры материала.

Вибрационное уплотнение бетона

Вибрация в бетоне реализует эффект тиксотропного разжижения цементной суспензии, что позволяет достичь более плотной упаковки частиц цемента и заполнителя, а также эффективно удалять захваченный воздух. Тиксотропия – это свойство некоторых материалов, заключающееся в уменьшении вязкости под действием механического воздействия (например, вибрации). В случае бетона вибрация разрушает структуру, сформированную за счет сил Ван-дер-Ваальса между частицами цемента,

что приводит к снижению вязкости и улучшению текучести бетонной смеси. В коллоидной химии этот эффект описывается как разрушение структуры геля под действием внешних сил.

Оптимальные параметры вибрации для уплотнения бетона обычно составляют: частота 150 ± 50 Гц, амплитуда $0,5 \pm 0,3$ мм. Выбор оптимальных параметров зависит от состава бетонной смеси, типа виброоборудования и геометрических размеров изделия [12].

Использование вибрационного уплотнения бетона приводит к снижению пористости с ~ 15 (для неуплотненного бетона) до 1–3 %. Снижение пористости способствует увеличению прочности бетона на сжатие, изгиб и растяжение, а также повышению его водонепроницаемости и морозостойкости.

Вибродегазация металлических расплавов

Для удаления растворенного водорода из металлических расплавов (например, алюминиевых сплавов) используется вибродегазация. Эффективность метода достигается при применении электромагнитных вибраторов, установленных на ковшах с расплавом. Электромагнитные вибраторы создают механические колебания, которые передаются расплаву металла.

Основной механизм дегазации – коалесценция пузырьков, обусловленная механизмом Бьеркнеса. В зависимости от частоты вибрации выделяются основные режимы поведения пузырьков.

В случае использования при вибродегазации низких частот ($f < 100$ Гц) возникает эффект коалесценции, характеризующийся притяжением мелких пузырьков газа и их слиянием в более крупные образования. Это обусловлено возникновением сил Бьеркнеса, которые вызывают взаимное притяжение пузырьков и способствуют их слиянию. Уравнение механизма Бьеркнеса, описывающее взаимодействие двух пульсирующих пузырьков, имеет следующий вид:

$$F_B = - \frac{2\pi\rho\omega^2 A^2 R_1^3 R_2^3}{d^4}, \quad (2)$$

где: F_B – сила взаимодействия между пузырьками; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; A – амплитуда вибрации; R_1, R_2 – радиусы пузырьков; ρ – плотность расплава; d – расстояние между центрами пузырьков; f – частота вибрации.

Согласно механизму Бьеркнеса, вибрирующие пузырьки создают акустические поля, которые взаимодействуют между собой, вызывая притяжение или отталкивание в зависимости от их размеров и расстояния между ними. Коалесценция пузырьков приводит к их слиянию и образованию более крупных пузырей, которые легче удаляются из расплава.

Так вибродегазация обеспечивает снижение содержания растворенного водорода в алюминиевых сплавах на 50–70 %. Это уменьшает вероятность образования пор в отливках и улучшает их механические свойства [13].

Вибрационное формование порошков (керамика, металлы)

При изготовлении изделий из керамики или порошковых металлов используется изостатическое прессование с наложением вибрации. Вибрация обеспечивает более плотную упаковку частиц порошка, что приводит к увеличению плотности и снижению пористости готового изделия. Это обеспечивает повышение прочности и улучшение эксплуатационных характеристик изделий.

Далее рассмотрим некоторые теоретические модели вибрационного воздействия на материал в процессе непрерывной намотки стеклопластиковых труб.

При воздействии вибрации структура полимерного материала может разрушаться, при этом происходит снижение его эффективной вязкости. Для каждого типа пузырька газа существует резонансная частота, при которой он начинает эффективно поглощать энергию из осциллирующего поля, при этом пузырьки начинают интенсивно колебаться.

Для эффективного удаления газообразных включений необходимо, чтобы частота вибрации была близка к резонансной частоте пузырьков газа в связующем. В этом случае пузырьки начинают интенсивно колебаться и объединяться друг с другом, что способствует их коалесценции и удалению из связующего.

Рассмотрим модель эффективной вязкости, которая описывает зависимость вязкости материала от интенсивности вибрационного воздействия:

$$\eta_{eff} = \eta_0 e^{(-k\Gamma t)} + \eta_{\infty}, \quad (3)$$

где η_{eff} – текущее эффективное значение величины вязкости в момент времени t ; η_0 – начальное значение величины вязкости при $t = 0$; η_{∞} – конечное, установившееся значение величины вязкости при $t \rightarrow \infty$; k – константа скорости процесса релаксации; Γ – средняя скорость сдвига; t – время.

При намотке наличие наполнителя в полимерном связующем увеличивает его вязкость и изменяет его реологические свойства. При этом следует учитывать влияние наполнителя на параметры модели (η_0 , Γ). Для этого могут использоваться модели, описывающие зависимость эффективной вязкости суспензий и эмульсий [14].

Так как полимерные композиты обладают анизотропными свойствами, величина вязкости зависит от направления деформации. Таким образом, необходимо учитывать анизотропию при моделировании поведения связующего и наполнителей под действием вибрации. Для этого следует использовать тензорные представления вязкости.

Кроме модели эффективной вязкости, для описания влияния на полимерные связующие вибрации в процессе переработки важными являются модель вибросмачивания и модель, описывающая динамику поведения пузырей в осциллирующем поле. Эти модели позволяют оценить влияние вибрации на деаэрацию и смачивание, которые являются ключевыми факторами, определяющими пористость и качество композиционных материалов.

Осциллирующее поле, создающее вибрацию в жидкости, воздействует на пузырьки газа, вызывая их колебания, перемещение и коалесценцию. Для эффективной дегазации необходимо, чтобы пузырьки газа коалесцировали и образовывали более крупные пузыри, которые легче удаляются из жидкости.

При определении условий, при которых происходит слияние пузырьков в осциллирующем поле, используется критерий коалесценции, который рассчитывается на сравнении сил притяжения между пузырьками и сил, препятствующих их слиянию. Условие коалесценции двух пузырьков радиусом R записывается в виде:

$$\frac{A\omega}{R} > \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho R^3}}, \quad (4)$$

где A – амплитуда вибрации, м; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота вибрации, рад/с; f – частота, Гц; R – радиус пузырька, м; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Критерий коалесценции показывает, что коалесценция пузырьков произойдет, если сила притяжения между ними (сила Бьеркнеса) превысит силу сопротивления слиянию. Для эффективной деаэрации необходимо, чтобы критерий коалесценции выполнялся для большинства пузырьков газа в жидкости.

Движение пузыря к свободной поверхности в вязкой жидкости под действием вибрации описывается уравнением, учитывающим различные силы, действующие на пузырь:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_b - F_d - mg + ma_v \sin \omega t, \quad (5)$$

где z – вертикальная координата пузырька; t – время; $F_b = 4/3\pi R^3 \rho g$ – выталкивающая сила; $F_d = 6\pi\eta R(dz/dt)$ – сила Стокса; $a_v = A\omega^2$ – виброускорение; m – эффективная масса пузырька с присоединенной массой жидкости.

Уравнение движения показывает, что движение пузыря определяется балансом сил, действующих на него. Выталкивающая сила и сила, обусловленная вибрационным ускорением, способствуют движению пузыря вверх, а сила Стокса препятствует этому движению.

Как сказано ранее, важным механизмом, определяющим влияние вибрации на процесс формирования структуры стеклопластиковой трубы, является динамика газовых пузырей в вибрирующем связующем. Наличие газовых пузырей в композите приводит к образованию пор, что снижает его прочность, водонепроницаемость и долговечность. Вибрация оказывает существенное влияние на движение, коалесценцию и разрушение газовых пузырей, что позволяет эффективно удалять их из композита.

Динамика газовых пузырей в вибрирующем связующем описывается модифицированной моделью Рэлея–Плессета, учитывающей влияние вибрационного давления на изменение радиуса пузыря во времени. Уравнение Рэлея–Плессета, описывающее радиальные колебания сферического пузыря в жидкости имеет следующий вид:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho} \left[P_g - P_0 - P_{vib} \sin \omega t - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\eta}{R} \cdot \frac{dR}{dt} \right], \quad (6)$$

где P_g – давление газа внутри пузырька; P_0 – статическое давление в жидкости; $P_{vib} = \rho A \omega^2 L_0$ – амплитуда вибрационного давления; L_0 – характерное расстояние от вибрирующей оправки до зоны пропитки.

Уравнение (6) показывает, что динамика изменения радиуса пузыря зависит от следующих сил: давления внутри пузыря, давления в жидкости, поверхностного натяжения, вязкого трения и вибрационного давления. При этом вибрационное давление оказывает дополнительное воздействие на радиус пузыря, вызывая его сжатие или расширение.

Модель эффективной вязкости позволяет использовать ее для описания поведения полимерных композитов при вибровоздействии, но при этом необходимо учитывать следующую особенность. Для пузырей с радиусом ~100 мкм резонансная частота составляет ~115 Гц, при которой наблюдается максимальная амплитуда колебаний и, соответственно, разрушение пузырей.

Ключевые этапы формирования структуры стеклопластиковой трубы – пропитка армирующего материала (волокна, кварцевого песка) полимерным связующим, укладка пропитанных наполнителей на оправку, дегазация (удаление захваченного воздуха) и гелеобразование (отверждение) полимерной матрицы [15]. Вибрационное воздействие, используемое на различных этапах процесса намотки, оказывает существенное влияние при протекании этих ключевых физических явлений на конечные свойства композита. Для разработки эффективных параметров воздействия на структуру стеклопластиковой трубы с помощью вибрации необходимо провести системный анализ технологических стадий и выявить механизмы воздействия вибрации на каждом из этих этапов.

Формирование структуры стеклопластиковой трубы при непрерывной намотке – многофакторный процесс, при котором вибрационное воздействие оказывает влияние на основные физические явления. Рассмотрим их с акцентом на механизмы взаимодействия с колебаниями.

Первый и один из важнейших этапов формирования структуры стеклопластиковой трубы – пропитка армирующего волокна полимерным связующим. Эффективность данного процесса определяет степень заполнения межволоконного пространства связующим, что напрямую влияет на механические характеристики и пористость готового композита. Применение вибрации на этапе пропитки может существенно интенсифицировать этот процесс, улучшая смачивание, снижая вязкость и способствуя удалению воздуха [16].

Процесс пропитки волокна полимерным связующим определяется в первую очередь капиллярными силами, обеспечивающими проникновение жидкости в узкие каналы между волокнами. Перемещение жидкости по капиллярам в пористой среде (в данном случае в жгуте стеклоровинга) можно описать уравнением Лукаса–Вашбурна:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r_{cap} \sigma \cos \theta}{4\eta_{eff} l}, \quad (7)$$

где l – длина пути перемещения связующего в жгуте стеклоровинга за время t , м; σ – поверхностное натяжение связующего, Н/м; r_{cap} – диаметр капилляра, м (для стеклоровинга эффективный диаметр капилляра определяется как расстояние между волокнами); θ – краевой угол смачивания, рад; η_{eff} – динамическая вязкость связующего, Па·с; t – время, с.

Уравнение (7) показывает, что скорость пропитки пропорциональна поверхностному натяжению и косинусу и обратно пропорциональна вязкости, а также уменьшается с ростом длины пропитанного участка (l). Таким образом, для эффективной пропитки необходимо использовать жидкости с низким поверхностным натяжением и хорошей смачиваемостью, а также с низкой вязкостью. Уравнение (7) также показывает, что величина проникновения жидкости увеличивается со временем, но скорость проникновения замедляется по мере увеличения глубины. Это связано с тем, что сопротивление течению жидкости увеличивается по мере заполнения капилляров.

Еще одно явление, определяющее влияние вибрации на процесс формирования структуры стеклопластиковой трубы, – улучшение смачивания стеклянного волокна полимерным связующим. Хорошее смачивание волокна обеспечивает прочное сцепление между волокном и матрицей, а это повышает механические свойства и долговечность композита. Вибрация также оказывает влияние на динамику смачивания, так как снижается краевой угол смачивания и увеличивается скорость растекания связующего по поверхности волокна [17].

Для описания влияния вибрации на процесс смачивания используется динамическая модель, которая учитывает влияние капиллярных, вязких и инерционных сил. Уравнение, описывающее динамический краевой угол смачивания под воздействием вибрации, можно представить в виде:

$$\cos \theta_{dyn} = \cos \theta_0 + \frac{A^2 \omega^2 \rho r}{2\sigma} \Phi(Ca, We), \quad (8)$$

где θ_{dyn} – динамический краевой угол смачивания (угол между касательной к поверхности жидкости и поверхностью твердого тела в точке трехфазного контакта при наличии движения); θ_0 – равновесный краевой угол смачивания – угол Юнга (угол между касательной к поверхности жидкости и поверхностью твердого тела в точке трехфазного контакта в состоянии равновесия); $\Phi(Ca, We)$ – эмпирическая функция, зависящая от капиллярного числа (Ca) и числа Вебера (We), описывающая влияние динамических эффектов на смачивание; r – радиус элементарного стекловолокна [18].

Уравнение (8) показывает, что динамический краевой угол смачивания зависит от равновесного краевого угла смачивания и от динамических эффектов, описываемых эмпирической функцией Φ . Капиллярное число характеризует влияние вязких сил на процесс смачивания. Чем больше капиллярное число, тем сильнее влияние вязких сил и тем медленнее происходит смачивание. Число Вебера характеризует влияние инерционных сил на процесс смачивания. Чем больше число Вебера, тем сильнее влияние инерционных сил и тем быстрее происходит смачивание. Вибрация влияет на капиллярное число и число Вебера, изменяя вязкость связующего и скорость его движения.

При увеличении частоты и амплитуды вибрации происходит снижение динамического краевого угла смачивания, что свидетельствует об улучшении смачивания стеклянного волокна. Механизм влияния вибрации на смачивание заключается в снижении энергетического барьера на линии контакта. Энергетический барьер препятствует растеканию жидкости по поверхности стеклянного волокна. Вибрация создает колебания молекул связующего, что облегчает преодоление энергетического барьера и способствует растеканию жидкости по поверхности стеклянного волокна.

Один из важных факторов, определяющих свойства стеклопластиковой трубы, – содержание воздушных включений (пор). Повышенное содержание пор приводит к снижению механических свойств, повышению водопроницаемости и снижению долговечности композита. Вибрация оказывает существенное влияние на динамику ускорения удаления воздуха из композита и способствует коалесценции пузырей и ускорению их движения к поверхности.

Завершающим этапом формирования структуры стеклопластиковой трубы является отверждение полимерного связующего. На этом этапе происходит образование трехмерной полимерной сетки, что приводит к увеличению прочности, жесткости и термостойкости материала. Вибрация оказывает влияние на кинетику гелеобразования, а также на структуру и свойства формирующейся полимерной сетки. С учетом вибродействия можно рассмотреть следующую модель полимеризации:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_0 + k_v e^{-B\eta})(1 - \alpha)^n e^{-E_a/RT}, \quad (9)$$

где $d\alpha/dt$ – скорость изменения степени превращения (скорость полимеризации); E_a – энергия активации полимеризации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; α – степень превращения (степень полимеризации); k_v – вибрационный коэффициент; k_0 – константа скорости полимеризации при отсутствии вибрации; B – параметр затухания вибрационного эффекта с ростом вязкости; n – показатель степени, характеризующий зависимость скорости от остаточной концентрации мономера.

Фундаментальное воздействие вибрации на композит в процессе формования заключается в изменении реологических свойств связующего. Одним из ключевых механизмов является влияние вибрации на реологические свойства связующего, а именно – вибрационная тиксотропия [19].

Вибрационная тиксотропия – это явление снижения вязкости материала под воздействием вибрации. В полимерных композитах это проявляется в снижении вязкости связующего, что облегчает его течение и улучшает пропитку армирующего материала.

В полиэфирных связующих пространственная сетка водородных связей обеспечивает относительно высокую вязкость в состоянии покоя. Вибрационное воздействие нарушает сетку водородных связей, и это приводит к снижению вязкости. С точки зрения физико-химии полимеров водородные связи представляют собой слабые межмолекулярные взаимодействия, которые могут быть легко разрушены под действием механических колебаний. Энергия, получаемая молекулами связующего при воздействии вибрации, превышает энергию водородных связей, что приводит к их разрыву. Этот

процесс аналогичен процессу тиксотропного разжижения в коллоидных системах, где разрушение структуры геля при вибрации приводит к снижению вязкости.

Несмотря на значительный потенциал применения вибрации для повышения качества слоистых полимерных композитов, необходимо учитывать возможные негативные последствия и ограничения, связанные с вибрационным воздействием. Превышение определенных критических значений параметров вибрации может привести к нежелательным явлениям, таким как сепарация наполнителя, возникновение термоупругих напряжений и резонанс конструкций. Применение вибрации в процессе намотки композитов может приводить к следующим критическим явлениям.

При превышении определенного значения ускорения вибрации ($a > 0,5g$, где g – ускорение свободного падения; $a = A(2\pi f)^2$; A – амплитуда; f – частота) происходит сепарация наполнителя, в результате чего более тяжелые частицы (например, песок) оседают в нижней зоне, а более легкие (например, полимерное связующее) поднимаются вверх. Сепарация наполнителя приводит к неравномерному распределению компонентов в композите, что ухудшает его механические свойства и может привести к образованию зон с повышенной пористостью. Это явление связано с действием силы инерции, которая пропорциональна массе частицы и ускорению вибрации. При достаточно большом ускорении сила инерции становится больше силы сопротивления среды, и частицы начинают перемещаться под действием этой силы. С точки зрения механики дисперсных систем сепарация наполнителя является проявлением гравитационной неустойчивости суспензии под действием вибрации [20].

При использовании высокочастотной вибрации ($f > 300$ Гц) в материале могут возникать термоупругие напряжения, обусловленные локальным нагревом из-за внутреннего трения и вязкоупругой диссипации энергии. Локальный нагрев может приводить к значительному повышению температуры и термическому разложению или деформации полимерного связующего. Интенсивность нагрева материала зависит от частоты и амплитуды деформации, а также от вязкоупругих свойств материала. При высокочастотной вибрации создается большое количество циклов деформации в единицу времени, что и приводит к значительному нагреву материала.

При совпадении частоты вибрации с собственной частотой колебаний оправки или других элементов оборудования может возникнуть резонанс, который приведет к значительному росту амплитуды колебаний и возникновению высоких напряжений в конструкции. Резонанс также может привести к разрушению оправки или других элементов оборудования, а также к снижению качества ПКМ. С точки зрения теории колебаний, резонанс возникает, когда внешнее воздействие оказывает максимальное влияние на колебательную систему. Для предотвращения резонанса частота вибрации должна отличаться от собственных частот колебаний элементов оборудования.

Вибрация также ускоряет процесс отверждения, что может приводить к преждевременному затвердеванию связующего и невозможности удаления воздушных пузырей. Параметры вибрации необходимо тщательно контролировать, чтобы избежать преждевременного затвердевания и обеспечить эффективную деаэрацию. В то же время вибрация может снижать пиковую экзотерму, что уменьшает усадочные напряжения в процессе отверждения. Снижение же усадочных напряжений способствует повышению прочности и долговечности композита.

При выборе параметров вибрации на конкретном оборудовании необходимо учитывать практические ограничения, учитывающие применение стальных оправок и энергозатрат проводимого вибрационного воздействия. При этом максимальная амплитуда вибрации ограничена прочностью материала оправки. Для стальных оправок максимальная амплитуда вибрации обычно составляет 1,5 мм для труб с диаметром менее 500 мм и 0,5 мм – для труб с диаметром более 1000 мм. Превышение максимальной

амплитуды вибрации может привести к возникновению усталостных трещин и даже к разрушению оправки. Максимальная амплитуда вибрации также зависит от частоты вибрации и конструкции оправки, что требует определенных энергозатрат на создание вибрации. Энергозатраты при вибрационном методе обычно составляют 0,8–3,0 кВт на тонну композита и зависят от параметров вибрации, конструкции оборудования и свойств материала. Для снижения энергозатрат необходимо оптимизировать параметры вибрации и использовать энергоэффективное оборудование.

Заключения

На основе анализа физических механизмов вибрационного воздействия, включающего инерционные силы, акустические течения и резонансные явления, а также обзора успешных промышленных прецедентов, таких как виброуплотнение бетона, вибродегазация металлических расплавов и вибрационное формование порошков, установлено, что управляемая низкочастотная вибрация является эффективным и энергоэкономичным способом снижения пористости полимерных композитов, формируемых методом непрерывной намотки. Модель вибрационной тиксотропии позволяет прогнозировать эффективную вязкость связующего в зависимости от скорости сдвига и времени воздействия, а критерий коалесценции газовых пузырьков, выраженный через безразмерное вибрационное число Вебера, определяет пороговые условия начала слияния пузырьков. Уравнение движения пузыря в вязкой среде и модифицированное уравнение Рэлея–Плессета дают возможность анализировать радиальные пульсации пузырьков и оценивать их резонансную частоту, которая для характерного размера пор составляет ~115 Гц. Динамическое смачивание описано зависимостью, связывающей краевой угол с вибрационным числом Вебера и капиллярным числом, что позволило учесть влияние вибрации на растекание смолы по поверхности элементарных волокон. Кинетика отверждения представлена моделью, учитывающей вибрационное ускорение реакции и его воздействие на пиковую экзотерму.

Таким образом, совокупность полученных результатов формирует научно обоснованную методику выбора частотно-амплитудных параметров вибрационного модуля, которая обеспечивает достижение минимальной остаточной пористости трехслойных стеклопластиковых труб при сохранении структурной однородности, технологичности и экономической эффективности непрерывного процесса намотки.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). С. 81–92. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
4. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.07.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Ерасов В.С., Сibaев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). С. 61–81. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.07.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.

6. Сутубалов А.И., Подживотов Н.Ю., Шершак П.В., Яковлев Н.О. Оценка однородности физико-механических свойств полуфабрикатов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). С. 121–135. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.07 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
7. Каган Д.Ф. Трубопроводы из пластмасс. М.: Химия, 1980. 295 с.
8. Иванов С.В. Стеклопластик – композиционный материал для труб // *Трубопроводы и экология*. 2001. № 2. С. 7.
9. Антошин В.А., Мельников Д.А., Иванов С.В., Албагачиев А.Ю. Определение долговременных прочностных свойств стеклокомпозитных труб для расчета срока эксплуатации // *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: науч. тр. VII Междунар. науч. конф. М., 2021. С. 29–30.*
10. Богданов В.В., Торнер Р.В. Смешение полимеров. Л.: Химия, 1979. 192 с.
11. Yang X., Zhan L., Peng Y. et al. Interface controlled micro- and macro-mechanical properties of vibration processed carbon fiber/epoxy composites // *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 16. Art. 2764. DOI: 10.3390/polym13162764.
12. Куннос Г.Я. Вибрационная технология бетона. Л.: Стройиздат, 1967. С. 134–150.
13. Эскин Г.И. Развитие ультразвуковой обработки расплава. Мои 45 лет в ВИЛСе // *Технология легких сплавов*. 2021. № 3. С. 61–71. DOI: 10.24412/0321-4664-2021-3-61-71.
14. Белоусов А.П., Белоусов П.Я., Боряняк Л.А. Определение скорости и размера пузырьков в двухфазных потоках с помощью лазерного доплеровского анемометра // *Автометрия*. 2015. Т. 51. № 6. С. 47–51.
15. Liu Z., Wang H., Chen Y. et al. Study on Curing Kinetics and the Mechanism of Ultrasonic Curing of an Epoxy Adhesive // *Polymers*. 2022. Vol. 14. No. 3. Art. 512. DOI: 10.3390/polym14030512.
16. Блазнов А.Н., Ходакова Н.Н., Самойленко В.В. и др. Исследование различных схем намотки изделий на основе базальтового и стеклянного ровингов // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2016. № 4 (16). С. 9.
17. Wallenberger F.T., Bingham P.A. *Fiberglass and Glass Technology: Energy-Friendly Compositions and Applications*. Springer, 2009. P. 474.
18. Gaidachuk O., Kondratiev A., Taranenko I. et al. Method of winding of small-diameter pipes using vibration effects // *Energy and Sustainability II, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Vol. 261. Springer, 2023. P. 175–184. DOI: 10.1007/978-3-031-46874-2_16.
19. Басов Н.И., Любартович С.А., Любартович В.А. Виброформование полимеров. Л.: Химия, 1979. 159 с.
20. Бальчугов А.В., Бадеников А.В., Баранова А.А. Критериальное уравнение процесса седиментации в переходном режиме // *Вестник АГТУ*. 2023. Т. 1. № 17. С. 8–10.

References

1. Kablov E.N. New-Generation Materials and Digital Technologies for Their Processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Slavin A.V., Donetskii K.I., Khrulkov A.V. Prospects for the use of polymer composite materials in aircraft structures in 2025–2035 (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), pp. 81–92. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 20, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
3. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New-Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
4. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 61–81. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.

6. Sutubalov A.I., Podzhivotov N.Yu., Shershak P.V., Yakovlev N.O. Evaluation of homogeneity of physical and mechanical properties of semi-finished products for aviation purpose. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 121–135. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
7. Kagan D.F. *Plastic Pipelines*. Moscow: Khimiya, 1980, 295 p.
8. Ivanov S.V. Fiberglass-reinforced plastic: a composite material for pipes. *Truboprovody i ekologiya*, 2001, no. 2, p. 7.
9. Antoshin V.A., Melnikov D.A., Ivanov S.V., Albagachiev A.Yu. Determination of long-term strength properties of glass-composite pipes for service life calculation. *Fundamental Research and Innovative Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of the VII Int. Sci. Conf.* Moscow, 2021, pp. 29–30.
10. Bogdanov V.V., Torner R.V. *Polymer Blending*. Leningrad: Khimiya, 1979, 192 p.
11. Yang X., Zhan L., Peng Y. et al. Interface controlled micro- and macro-mechanical properties of vibration processed carbon fiber/epoxy composites. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 16, art. 2764. DOI: 10.3390/polym13162764.
12. Kunnos G.Ya. *Vibration Technology for Concrete*. Leningrad: Stroyizdat, 1967, pp. 134–150.
13. Eskin G.I. Development of Ultrasonic Melt Treatment: My 45 Years at VILS. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2021, no. 3, pp. 61–71. DOI: 10.24412/0321-4664-2021-3-61-71.
14. Belousov A.P., Belousov P.Ya., Borynyak L.A. Determination of Bubble Velocity and Size in Two-Phase Flows Using a Laser Doppler Anemometer. *Avtometriya*, 2015, vol. 51, no. 6, pp. 47–51.
15. Liu Z., Wang H., Chen Y. et al. Study on Curing Kinetics and the Mechanism of Ultrasonic Curing of an Epoxy Adhesive. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 3, art. 512. DOI: 10.3390/polym14030512.
16. Blaznov A.N., Khodakova N.N., Samoilenko V.V. et al. Investigation of various winding patterns for products based on basalt and glass rovings. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2016, no. 4 (16), p. 9.
17. Wallenberger F.T., Bingham P.A. *Fiberglass and Glass Technology: Energy-Friendly Compositions and Applications*. Springer, 2009, p. 474.
18. Gaidachuk O., Kondratiev A., Taranenko I. et al. Method of winding of small-diameter pipes using vibration effects. *Energy and Sustainability II, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 261, Springer, 2023, pp. 175–184. DOI: 10.1007/978-3-031-46874-2_16.
19. Basov N.I., Lyubartovich S.A., Lyubartovich V.A. *Vibroforming of polymers*. Leningrad: Khimiya, 1979, 159 p.
20. Balchugov A.V., Badenikov A.V., Baranova A.A. Criterion equation for the sedimentation process in the transition regime. *Vestnik AGTU*, 2023, vol. 1, no. 17, pp. 8–10.

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

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

Славин Андрей Вячеславович, начальник Научно-исследовательского отделения, 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

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

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

Статья поступила в редакцию 20.08.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.08.2026.
The article was submitted 20.08.2026; approved and accepted for publication after reviewing 25.08.2026.