

## Метод поиска оптимальных параметров технологического процесса пропитки трехмерно-армированных композитных изделий на основе моделей машинного обучения

*Представлен новый подход к разработке адаптивного технологического процесса изготовления изделий из композиционных материалов. Исследуется экспериментальный образец, созданный методом 3D-ткачества, создана инженерная экспресс-модель, оптимизирующая параметры технологического процесса пропитки преформы. Модель использует данные о параметрах преформы и связующего для определения качественных характеристик конечного продукта. Согласно полученным результатам предложенный метод значительно снижает количество поверхностных пор в образцах и позволяет прогнозировать время пропитки, что критически важно для оптимизации производственного процесса. Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность разработанной модели и обосновали возможность ее практического применения в промышленности.*

**Л.П. ШАБАЛИН**,  
канд. техн. наук  
(КНИТУ-КАИ, Казань),  
**А.В. ПАХОМЕНКОВ**,  
канд. техн. наук  
(ПАО «ОДК-САТУРН»,  
Рыбинск),  
**Е.А. ПУЗЫРЕЦКИЙ**  
(КНИТУ-КАИ, Казань),  
eapuzyretskiy@kai.ru

**Трехмерно-армированное композитное изделие, трансферный метод формования, оптимальные параметры пропитки, численное моделирование, суррогатная модель, машинное обучение**

В настоящее время трансферные технологии формования широко применяются в композитной индустрии. В таких высокотехнологичных отраслях, как машиностроение, авиация и космическая техника, используются изделия из композиционных материалов, изготовленные методом пропитки сухой армирующей заготовки [1, 2]. Наиболее распространенной технологией является RTM, при которой связующее инжектируется под давлением в жесткую форму, состоящую из матрицы и пуансона, между которыми размещена сухая армирующая преформа.

Согласно экспериментальным данным пористость в полимерных композиционных материалах существенно влияет на прочностные свойства изделий, работающих в условиях изгибающих, сжимающих и сдвиговых нагрузок [3, 4]. В связи с этим в качестве показателей качества композитного изделия рассматривают его пористость, наличие или отсутствие непропитанных областей [5–7]. В качестве критерия качества может выступать и продолжительность пропитки: более короткое время пропитки следует рассматривать как предпочтительное, поскольку оно обеспечивает снижение трудозатрат при сопоставимых значениях прочих показателей качества.

Этап пропитки характеризуется многофакторностью, что оказывает влияние на качество изделия. Выделяют группы факторов, классифицируемых по их принадлежности к характеристикам преформы (коэффициент наполнения, проницаемость, влагонасыщенность), свойствам связующего (вязкость, начальная степень конверсии, скорость изменения степени конверсии) и условиям технологического процесса (схема инъекции и отвода, давление впрыска и отвода, температура впрыска, температура пресс-формы).

Низкая проницаемость преформы и высокая вязкость связующего могут привести к неполноценной пропитке изделия, неверно выбранный расход – к высокой пористости [8] и т. д. Трехмерно-армированные преформы, получаемые методом 3D-ткачества и применяемые в авиационных изделиях (например, в лопатках спрямляющего аппарата и рабочей лопатке вентилятора), характеризуются проблемой низкой воспроизводимости. Даже при фиксированных параметрах управляющей программы 3D-ткачества преформы могут возникнуть отклонения параметров полученной преформы от номинальных значений [9, 10]. Толщина преформы в RTM-процессах – ключевой параметр, который влияет на коэффициент наполнения, так как в RTM-процессах используют закрытые пресс-формы. Вследствие этого толщина изделия во всех точках остается постоянной независимо от толщины преформы. В связи с этим коэффициент наполнения преформы аналогично проницаемости изменяется в зависимости от ее

толщины. Данная зависимость отсутствует в процессах, подобных вакуумной инфузии, где используется односторонняя жесткая оснастка, а вакуумный мешок создает давление с противоположной стороны.

Похожая проблема воспроизводимости свойств может возникать и со связующим, на вязкость которого влияет начальная степень конверсии и состав. Во-первых, даже при хранении связующего в рамках требований поставщика его степень конверсии меняется [11]; во-вторых, свойства связующего могут менять от партии к партии в пределах возможных диапазонов, установленных техническими условиями. В таком случае определенные на этапе проектирования оптимальные параметры пропитки будут оптимальными не для всех изделий партии, а только для тех, свойства исходных материалов которых близки к использованным на этапе проектирования. Это может существенно влиять на качество вплоть до необходимости забраковки изделия.

Для получения качественного изделия при варьируемых свойствах исходных компонент материала (преформы и связующего) необходимо внесение изменений в процесс (давление, температура, расход, стратегия пропитки). Для создания такого адаптивного технологического процесса (рис. 1) требуется математический инструмент, с помощью которого можно подобрать оптимальные параметры процесса под свойства исходных компонент. Также для работы данного инструмента требуются методики входного контроля свойств преформы и связующего, адаптированные под конкретное изделие и материалы.

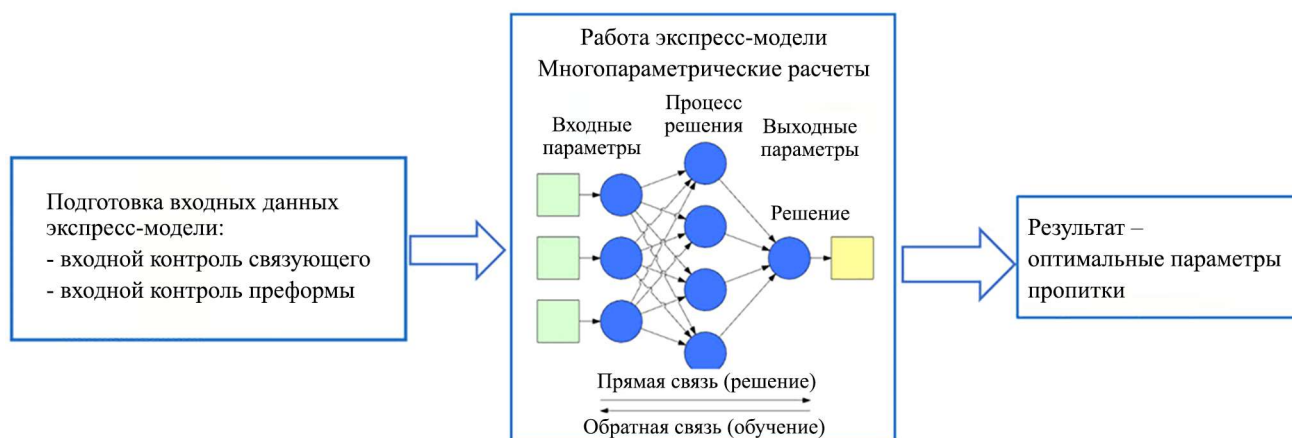


Рис. 1. Принципиальная схема адаптивного технологического процесса

Целью настоящего исследования является разработка инженерной экспресс-модели, предназначенной для определения оптимальных параметров технологического процесса пропитки композитного изделия. Термин «экспресс-модель» используется вследствие требования к определению оптимальных параметров формования в крайне сжатые сроки – в пределах нескольких минут.

Для разработки инженерной экспресс-модели предлагается метод, предполагающий последовательное выполнение следующих операций:

- разработка расчетной модели пропитки преформы;
- определение входных и выходных параметров экспресс-модели;
- параметризация расчетной модели;
- построение матрицы эксперимента;
- проведение расчетов;
- анализ данных, построение предсказательной модели;
- создание программного кода оптимизатора;
- создание пользовательского интерфейса экспресс-модели.

Расчет оптимальных параметров осуществляется с помощью суррогатной модели, представляющей собой статистическую модель, построенную на основании результатов работы численной модели [12–15]. Численная модель разрабатывается в программном комплексе ESI PAM-Composite. Анализ данных и написание программного кода экспресс-модели производится на языке Python.

Процесс фильтрации жидкостей в пористых средах описывается с помощью закона Дарси. Данный закон в отсутствие силы тяжести записывается следующим образом [16]:

$$0 = -\text{grad}p + \frac{\mu}{K}u, \quad (1)$$

где  $\text{grad}p$  – градиент давления, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $K$  – проницаемость среды, м<sup>2</sup>;  $u$  – скорость фильтрации, м/с.

Модель образования пористости представляет собой логарифмическую зависимость процентного содержания макро- и микропор от капиллярного числа [8]:

$$f(C_a) = A \log(BC_a) + C, \quad (2)$$

где  $A, B, C$  – экспериментально определяемые константы;  $C_a$  – капиллярное число.

Капиллярное число определяется из уравнения

$$C_a = \frac{\mu u}{\gamma \cos \theta}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – поверхностное натяжение связующего, Н/м;  $\theta$  – угол смачивания, град.

Используемые в рамках данного исследования параметры модели порообразования заимствованы из работы [8].

В ESI PAM-Composite реализована возможность автоматического подбора оптимального объемного расхода связующего для обеспечения оптимальной скорости фильтрации, минимизирующей пористость. В таком случае программа автоматически определяет требуемое давление впрыска, пользователь же имеет возможность ограничения верхней границы давления.

Граничные условия представляют собой объемный расход впрыска в торец замка изделия с ограничением верхней границы давления 700000 Па и отвод с давлением остаточного газа 500 Па. Также задается температура впрыска  $T_{\text{впр}} = 80$  °С и начальная температура преформы  $T_{\text{пр}}$  (варьируемый параметр).

Задаваемые в расчетной модели параметры материалов (проницаемость, коэффициент объемного наполнения, слойность, динамическая вязкость, начальная степень конверсии связующего) определяются теоретико-экспериментальными методами. Слойность определяет количество утковых нитей в той или иной области преформы и актуальна только в отношении трехмерно-армированных преформ. Слойность может оказывать влияние на физико-механические характеристики преформы, в том числе и на проницаемость, поэтому данный параметр выделяется как отдельный фактор.

Проницаемость является функцией коэффициента объемного наполнения  $v_i$  и слойности  $N_i$ . Для ее определения может быть использован метод одномерного стационарного потока [17–22] и оснастка [22]. Как правило, проницаемость имеет степенную или линейную зависимость от  $v_i$ . В связи с этим рекомендуется проведение как минимум трех экспериментов с различными значениями  $v_i$ . Учет влияния слойности на проницаемость существенно усложняет задачу идентификации, поскольку в преформе может присутствовать значительное количество зон слойности. В случае наличия  $N$  зон слойности минимально необходимое количество образцов –  $3N$ , что предполагает проведение соответствующего количества экспериментов.

Коэффициент объемного наполнения  $v_i^j$  может быть определен расчетно-экспериментальным методом:

$$v_i^j = k_i^j \frac{v_i^0}{k_i^0}, \quad (4)$$

где  $i$  – индекс зоны слойности;  $j$  – номер преформы в серии;  $k_i^j$  – коэффициент компактируемости рассматриваемой преформы;  $k_i^0$  – коэффициент компактируемости исходной преформы;  $v_i^0$  – коэффициент объемного наполнения исходной преформы.

Коэффициент компактируемости – это отношение средней толщины преформы под действием давления вакуумного мешка в 100000 Па к средней величине толщины изделия в данной зоне:

$$k_i^j = \frac{t_i^j}{\delta_i^j}, \quad (5)$$

где  $t_i^j$  – средняя толщина преформы, мм;  $\delta_i^j$  – средняя толщина изделия в данной зоне, мм.

Для реализации данного подхода необходимо экспериментальное определение коэффициентов  $v_i^0$ ,  $k_i^0$  для каждой зоны слойности исходной преформы.

Для определения средней толщины преформы используются результаты контрольно-измерительных процедур преформы в пресс-форме под вакуумным мешком (рис. 2).

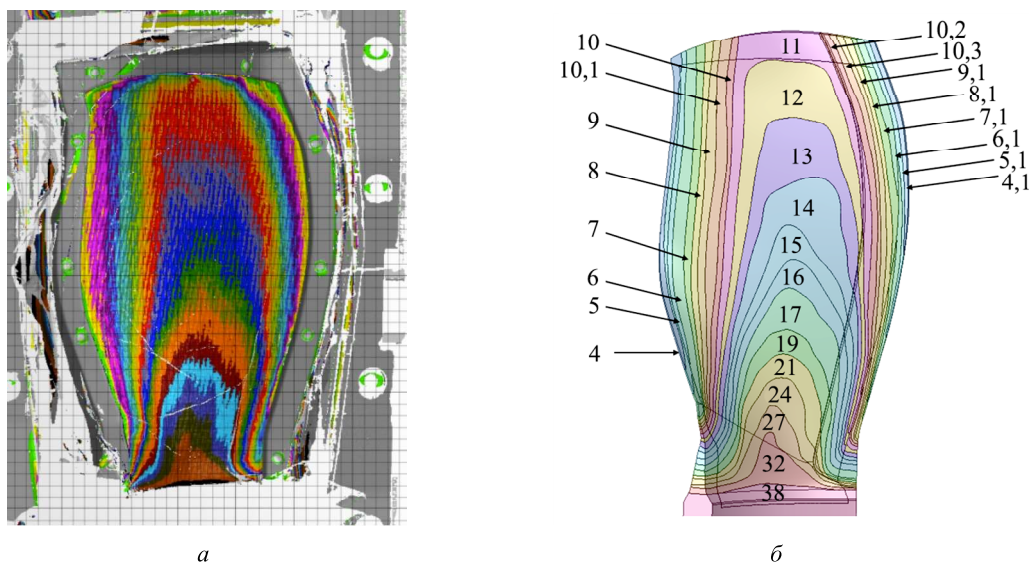


Рис. 2. Разбиение заготовки преформы на зоны слойности:  
*а* – цветовая карта толщин преформы; *б* – модель заготовки преформы с перенесенными зонами слойности

Очевидно, что границы зон слойности будут отличаться от преформы к преформе, в связи с чем модель разрабатывается только для одной базовой преформы. Изменение границ зон учитывается изменением среднего коэффициента объемного наполнения. В связи с этим каждая последующая преформа проходит входной контроль на предмет средней толщины каждой зоны слойности. Границы, в которых определяются средние толщины, берутся из исходной.

Динамическая вязкость связующего  $\mu$  является функцией температуры  $T_{св}$  и степени конверсии  $\alpha_{св}$ . Данная зависимость задается в ESI PAM-Composite в виде табличных данных зависимости  $f = \mu(\alpha_{св})$  при различных постоянных  $T_{св}$  (с шагом 5–10 °С). Динамическая вязкость определяется экспериментально с помощью реометра, закон изменения степени конверсии от времени определяется с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии [23]. Начальная степень конверсии связующего определяется по тому же методу.

Типовой результаты работы расчетной модели приведен на рис. 3.

При ручном задании оператором давления инъекции в процессе пропитки реального изделия график (см. рис. 3, *в*) требует модификации и должен быть аппроксимирован линейно-ступенчатой функцией.

С учетом описанных свойств расчетной модели входными параметрами расчетной модели должны выступать варьируемые характеристики – средняя толщина зон слойности, начальная степень конверсии связующего и температура преформы. Дополнительно требуется задание величины шага приращения давления инъекции.

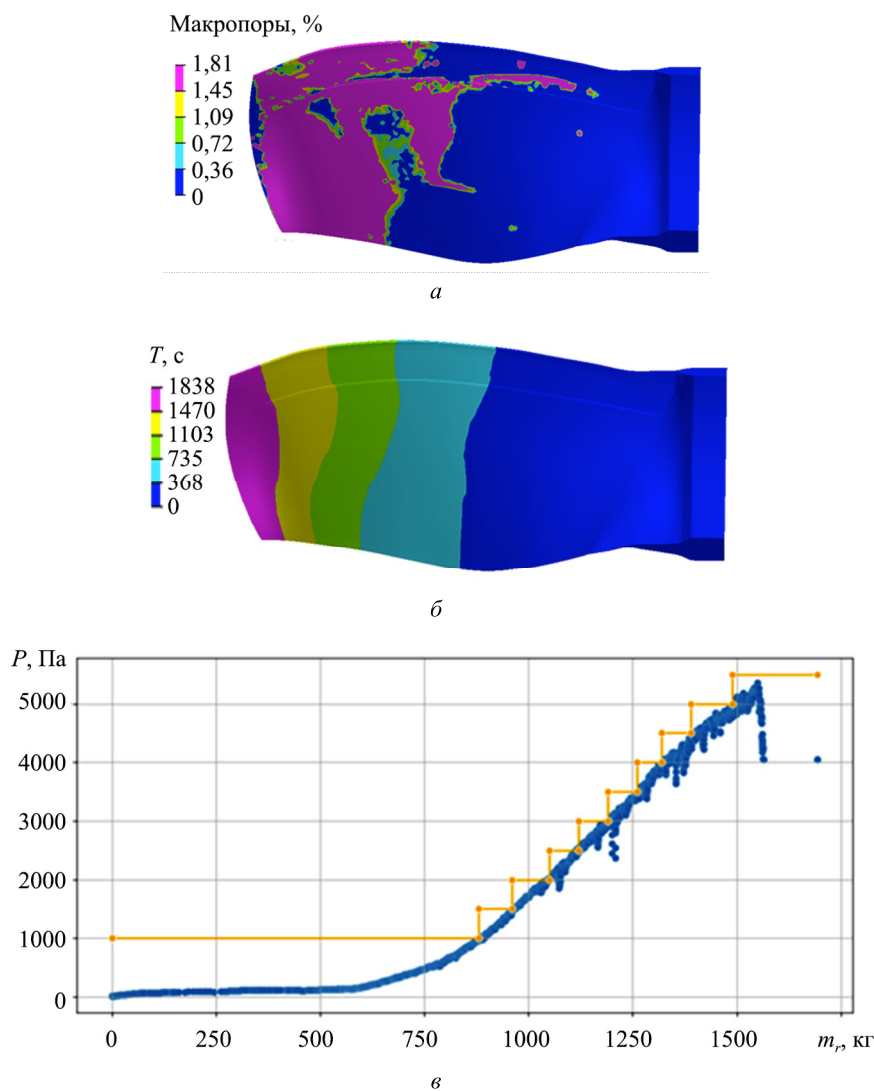


Рис. 3. Типовой результат работы расчетной модели: *a* – макропоры образца; *б* – время пропитки; *в* – зависимость давления инъекции от массы введенного связующего

Ограничения программного комплекса ESIPAM-Composite, не позволяющие осуществлять параметрическое исследование, обусловили необходимость ручного ввода входных переменных. Для снижения трудоемкости данного процесса средние толщины зон слоистости заменяются одним параметром – средним отклонением от толщины исходной преформы. Выходными параметрами являются график зависимости давления инъекции от массы введенного связующего, время пропитки и максимальное процентное содержание пор.

Допустимый диапазон температуры преформы для пропитки – 100...130 °С с шагом 10 °С. Степень конверсии связующего изменяется в диапазоне 0...15 % с шагом 5 %. Среднее отклонение толщины преформы от исходной – 0...15 % с шагом 5 %.

Таким образом, имеем три изменяемых параметра, каждый из которых может иметь четыре значения. Для рассмотрения комбинаций всех возможных вариантов составляется матрица из 256 расчетных вариантов.

С использованием разработанной модели была проведена серия расчетов для дальнейшего построения модели машинного обучения. Результаты корреляционного анализа по полученным данным представлены на рис. 4.

На основании полученных из расчета данных строятся алгоритмы для тестирования и проверки моделей. Оптимальная модель выбирается с подбором гиперпараметров из следующих моделей: LinearRegression, Lasso, Ridge, ElasticNet, SVR, KNeighborsRegressor, DecisionTreeRegressor, RandomForestRegressor, GradientBoostingRegressor.

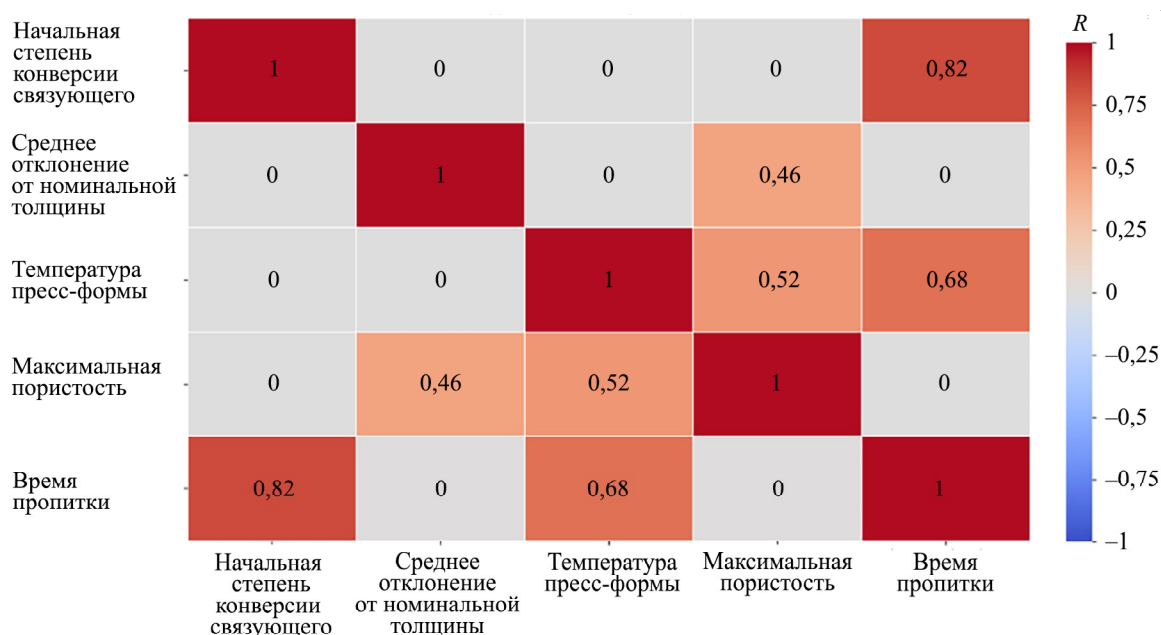


Рис. 4. Корреляционная матрица признаков

На основе полученных моделей разработано приложение для поиска оптимальных параметров пропитки. Оптимизация параметров осуществляется методом перебора всех возможных значений входных параметров в определенном интервале с определенным шагом. Затем данные значения подаются на вход модели, которая вычисляет выходные параметры. Целью работы оптимизатора является поиск такого набора параметров процесса, при которых обеспечивается условие минимума времени пропитки и минимума пористости. В итоге для оптимального кандидата строится линейно-ступенчатый график зависимости давления от массы введенного связующего.

Для подтверждения работоспособности методики проведено сравнение качества видовой поверхности трех образцов. Один из образцов изготовлен по стандартному режиму, два других – по режимам, полученным с помощью инженерной экспресс-модели.

В таблице приведены результаты входного контроля трех образцов.

Параметр	Результат		
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Среднее отклонение от номинальной толщины, %	0	2	9
Начальная степень конверсии связующего, %	0	0	0

Температура пропитки образца № 1 – 110 °С. По результатам работы инженерной экспресс-модели, оптимальная температура в случае образцов № 2, 3 – 116 °С.

Приведем оптимальные параметры процесса изготовления образца № 2 (рис. 5, а) и образца № 3 (рис. 5, б).

Образец № 1 пропитывался при постоянном избыточном давлении инъекции 150000 Па. Для образцов № 1–3 спрогнозированные значения времени пропитки и максимальной пористости составляют 17 мин /5,26 %, 9 мин /1,21 %, 10 мин /1,03 %.

На поверхности образца № 1 отмечается скопление макро- и микропор, тогда как на образце № 2 поры отсутствуют, а на образце № 3 присутствуют микропоры в небольшом количестве (рис. 6).

Образец № 1 был изготовлен за 18,4 мин, образец № 2 – за 10 мин, образец № 3 – за 11,5 мин. Таким образом, максимальная погрешность работы модели в части прогнозирования времени пропитки составляет 15 %, минимальная – 8,2 %.

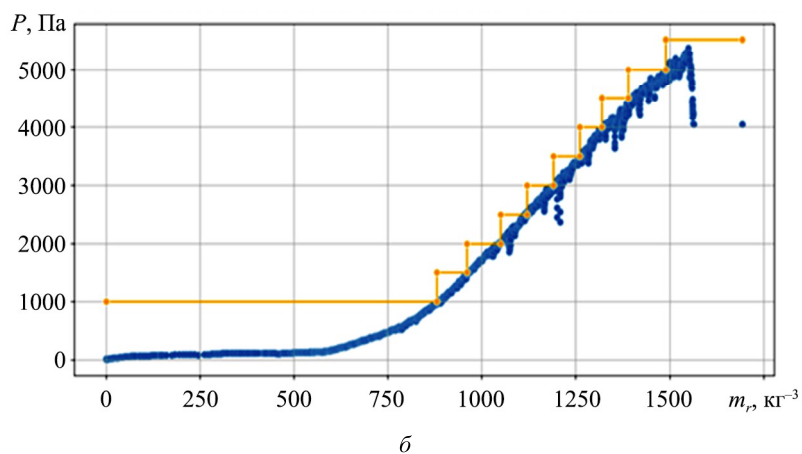
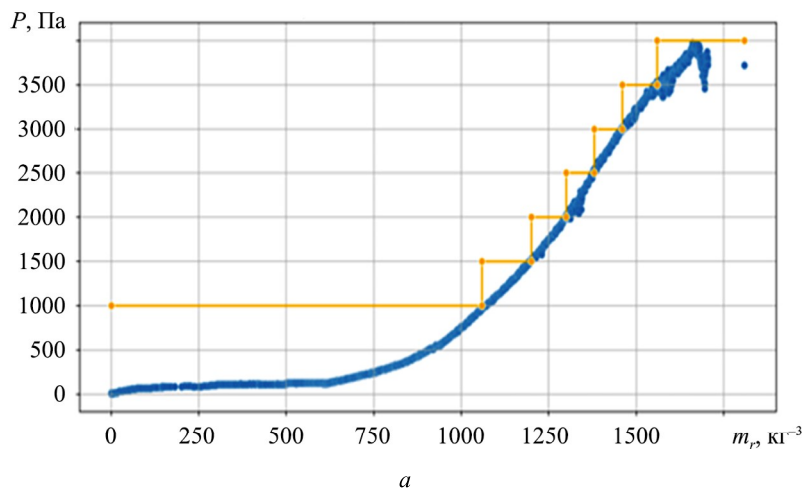


Рис. 5. Графики давления инъекции связующего

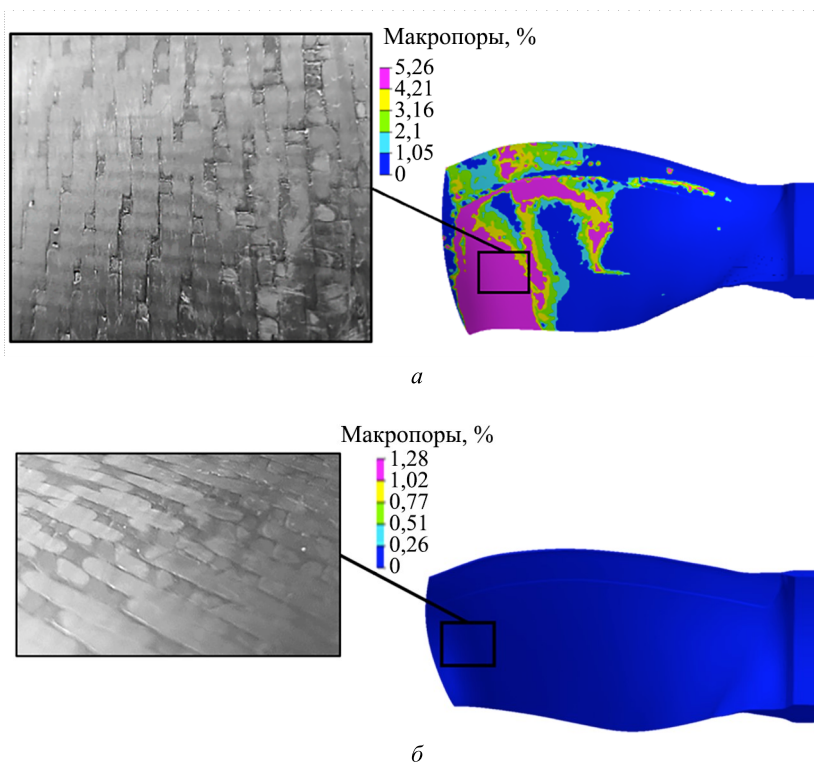


Рис. 6. Результаты визуального контроля изготовленных образцов:  
*a* – образец № 1; *b* – образец № 2; *в* – образец № 3 (Начало)

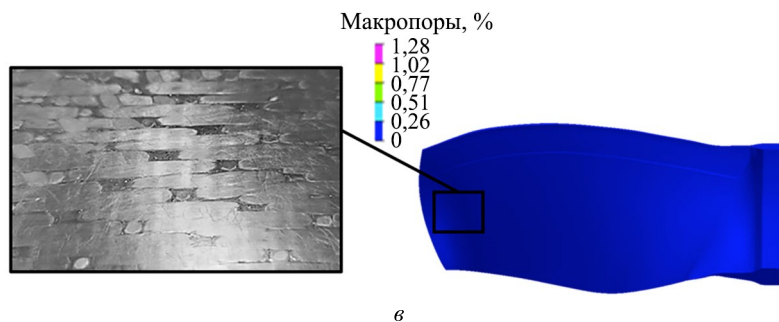


Рис. 6. Результаты визуального контроля изготовленных образцов:  
 а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3 (Окончание)

Таким образом, в рамках настоящего исследования разработана инженерная экспресс-модель для реализации адаптивного технологического процесса пропитки изделия из композиционного материала.

Разработанный метод демонстрирует хорошую эффективность для обеспечения высокого качества изделия. Так, инженерная экспресс-модель позволила минимизировать количество поверхностных пор образцов № 2, 3, тогда как в изготавливаемом по стандартной технологии образце № 1 присутствуют поверхностные поры в большом количестве. Также экспресс-модель позволяет спрогнозировать время, необходимое на пропитку, что позволяет отсеивать преформы, время пропитки которых превышает время жизни связующего.

В качестве альтернативы представленному методу может рассматриваться метод численного моделирования, так как с его помощью возможно оптимизировать параметры пропитки. Ключевой особенностью численного метода является отсутствие универсальности: для каждой комбинации преформы и связующего требуется проведение оптимизационных исследований. В связи с этим преимуществом предложенного метода является его высокая вычислительная эффективность: получение результата занимает менее 5 мин, в то время как применение численного моделирования требует не менее 24–32 ч. Погрешность представленного метода сопоставима с численным подходом. Также отметим, что использование представленного метода позволяет осуществлять дообучение суррогатных моделей, поскольку их обновление производится на основе вновь получаемых расчетных данных при каждом цикле использования.

К основным ограничениям метода относится необходимость ручного сбора расчетных данных и отсутствие в инженерной экспресс-модели суррогатной модели, описывающей зависимость формы кривой давления от входных параметров расчетной модели. В текущей реализации оптимальная кривая давления пропитки формируется на основе ближайшего доступного набора исходных данных. Первое ограничение может быть преодолено параметризацией расчетной модели с использованием стороннего программного обеспечения, например DTSeven. Второе ограничение устраняется описанием кривой давления какой-либо функцией, например линейной, состоящей из трех участков с разными углами наклона. В таком случае константы данной линейной функции могут быть выходными параметрами работы расчетной модели, численная оценка и обработка которых осуществима статистическими методами.

Исследования выполнены в рамках передовой инженерной школы «Комплексная авиационная инженерия» (соглашение 075-15-2025-129).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пузырецкий Е.А. и др. Моделирование и оптимизация процессов создания композитного тела гибридной лопасти тягового винта // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 3. С. 141–147.
2. Шабалин Л.П. и др. Разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния, оптимизации и экспериментального исследования гибридной конструкции композит-металлической лопасти тягового винта // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 2. С. 35–42.
3. Zhang A. et al. Effects of Void Content on Mechanical Properties of Carbon/Epoxycomposite Laminates // Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering. 2010. Vol. 21. Iss. 24. P. 3014–3018.
4. Батраков В.В. и др. Влияние режимов автоклавного формования и структуры технологического пакета на пористость конструкций из композиционных материалов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 1. С. 93–96.

5. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // Труды ВИАМ. 2016. № 6 (42). С. 68–78.
6. Коваль А.П., Бобарика И.О. Элементы алгоритма оптимизации технологического процесса вакуумной инфузии при изготовлении крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 192–196.
7. Коваль А.П., Бобарика И.О. Моделирование системы подачи связующего вещества в процессе вакуумной инфузии композитной панели // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 3. С. 197–202.
8. Ruiz E. et al. Optimization of Injection Flow Rate to Minimize Micro/Macro-Voids Formation in Resin Transfer Molded Composites // Composites Science and Technology. 2006. Vol. 66. Iss. 3-4. P. 475–486.
9. Snape A.E. et al. Stabilising and Trimming 3D Woven Fabrics for Composite Preforming Applications // Applied Composite Materials. 2018. Vol. 25. P. 735–746.
10. Gries T. et al. Aachen Technology Overview of 3D Textile Materials and Recent Innovation and Applications // Applied Composite Materials. 2022. Vol. 29. P. 43–64.
11. Baisirikov B.M. et al. Study of Prepregs Lifetime Based on Epoxy Resin with Aromatic Amine Hardener // Eurasian Physical Technical Journal. 2023. Vol. 20. № 3. P. 62–69.
12. Шоничев И.Д. и др. Нейросетевое прогнозирование параметров пропитки заготовок деталей из полимерных композиционных материалов // Промышленные процессы и технологии. 2025. № 2 (16). P. 79–94.
13. Karuppusamy M. et al. A Review of Machine Learning Applications in Polymer Composites: Advancements, Challenges, and Future Prospects // Journal of Materials Chemistry A. 2025. Vol. 13. P. 16290–16308.
14. Szarski M., Chauhan S. Instant Flow Distribution Network Optimization in Liquid Composite Molding Using Deep Reinforcement Learning // Journal of Intelligent Manufacturing. 2023. Vol. 34. P. 197–218.
15. Cassola S. et al. Machine Learning for Polymer Composites Process Simulation a Review // Composites Part B: Engineering. 2022. Vol. 246. Article № 110208.
16. Hiremath P. et al. Computational Approach for Optimizing Resin Flow Behavior in Resin Transfer Molding with Variations in Injection Pressure, Fiber Permeability, and Resin Sorption // Journal of Composites Science. 2025. Vol. 9. № 3. Article № 129.
17. Bittrich L. et al. On the Resin Transfer Molding (RTM) Infiltration of Fiber-Reinforced Composites Made by Tailored Fiber Placement // Polymers. 2022. Vol. 14. № 22. Article № 4873.
18. Dei Sommi A., Lionetto F., Maffezzoli A. An Overview of the Measurement of Permeability of Composite Reinforcements // Polymers. 2023. Vol. 15. № 3. Article № 728.
19. Naik N.K., Sirisha M., Inani A. Permeability Characterization of Polymer Matrix Composites by RTM/VARTM // Progress in Aerospace Sciences. 2014. Vol. 65. P. 22–40.
20. Amico S., Lekakou C. An Experimental Study of the Permeability and Capillary Pressure in Resin-Transfer Moulding // Composites Science and Technology. 2001. Vol. 61. Iss. 13. P. 1945–1959.
21. Han K.K., Lee C.W., Rice B.P. Measurements of the Permeability of Fiber Preforms and Applications // Composites Science and Technology. 2000. Vol. 60. Iss. 12-13. P. 2435–2441.
22. Оснастка для измерения компактируемости, проницаемости преформ и изготовления элементарных образцов с учетом технологической наследственности: пат. на полезную модель 226154 Рос. Федерация, № 2024101935; заявл. 26.01.2024; опубл. 22.05.2024, Бюл. № 15.
23. ГОСТ Р 55135-2012. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 2. Определение температуры стеклования. М.: Стандартинформ, 2014. 8 с.

Поступила в редакцию 14.10.25  
 После доработки 16.10.25  
 Принята к публикации 16.10.25

## A Method for Searching for Optimal Parameters of the Technological Process of Impregnation of Three-Dimensional Reinforced Composite Products Based on Machine Learning Models

L.P. SHABALIN<sup>1</sup>, A.V. PAKHOMENKOV<sup>2</sup>, AND E.A. PUZYRETSKII<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

<sup>2</sup> PAO "UEC-SATURN", Rybinsk

*A new approach to developing an adaptive manufacturing process for composite materials is presented. An experimental sample created using 3D weaving is studied, and a rapid engineering*

*model is created to optimize the parameters of the preform impregnation process. The model uses data on the preform and resin parameters to determine the quality characteristics of the final part. According to the results obtained, the proposed method significantly reduces the number of surface defects in samples and allows for predicting injection time, which is critical for optimizing the manufacturing process. The conducted studies confirmed the high efficiency of the developed model and substantiated its practical application in industry.*

**Three-dimensionally reinforced composite part, transfer molding method, optimal injection parameters, numerical modeling, surrogate model, machine learning**