



Научная статья
УДК 678.5–48.044
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188834>
EDN: <https://www.elibrary.ru/XNKSAQ>

Методика испытания ненасыщенной проницаемости композитных преформ как функции коэффициента наполнения

Леонид Павлович Шабалин¹, Евгений Александрович Пузырецкий^{2✉}, Оскар Ленарович Хамидуллин³,
Наиль Фаизович Салихов⁴

^{1, 2, 3, 4} Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева —
КАИ (КНИТУ-КАИ), Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

¹ lpshabalin@kai.ru, ORCID 0000-0002-6246-7699

² EAPuzyretskiy@kai.ru[✉], ea.puzyretskiy@mail.ru

³ olkhamidullin@kai.ru

⁴ NFSalikhov@kai.ru

Аннотация. Представлена методика определения ненасыщенной проницаемости композитных преформ как функции коэффициента наполнения в рамках одного эксперимента. Предлагаемый подход позволяет сократить количество необходимых образцов и трудозатраты при испытаниях, что особенно актуально при работе с 3D-ткаными преформами. Методика основана на сопоставлении результатов испытаний ненасыщенной и насыщенной проницаемости одного и того же образца с последующим пересчетом данных через коэффициент пропорциональности. Апробация проведена на композитных 3D-тканых преформах. Результаты показали, что полученные значения ненасыщенной проницаемости согласуются со стандартными методами испытаний, при этом погрешность не превышает 11,7%. Разработанный подход обеспечивает значительное упрощение экспериментальной процедуры и может быть использован для оптимизации расчетов при прогнозировании процессов пропитки в технологии трансферного формования.

Ключевые слова: ненасыщенная проницаемость, насыщенная проницаемость, коэффициент наполнения композиционного материала, методики испытаний проницаемости преформы, трансферное формование, 3D-тканые композитные преформы, закон Дарси, пропитка связующим

Финансирование: работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение №15/2025-ПД-КАИ от 22.12.2025)

Для цитирования: Шабалин Л.П., Пузырецкий Е.А., Хамидуллин О.Л., Салихов Н.Ф. Методика испытания ненасыщенной проницаемости композитных преформ как функции коэффициента наполнения // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 3. С. 178–186. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188834>

Original article

A Technique for the Composite Materials Unsaturated Permeability Testing of Composite Preforms as a Function of the Filling Ratio

Leonid P. Shabalin¹, Evgeny A. Puzyretskiy^{2✉}, Oscar L. Khamidullin³, Nail F. Salikhov⁴

^{1, 2, 3, 4} Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev- KAI, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

¹ lpshabalin@kai.ru, orcid 0000-0002-6246-7699

² EAPuzyretskiy@kai.ru[✉], ea.puzyretskiy@mail.ru

³ olkhamidullin@kai.ru

⁴ NFSalikhov@kai.ru

Abstract

The article presents an original technique for determining the unsaturated permeability of composite preforms as a function of the filling ratio, which allows obtaining the entire functional dependence in a single experiment. The relevance of the development is stimulated by the need to predict the impregnation processes in manufacturing the products from polymer composite materials by the transfer molding (RTM). Exact knowledge of the permeability dependence on the filling ratio is critically important for computational optimization of the impregnation modes, preventing formation of the defects in the form of residual porosity and dry zones, which significantly reduce the products operational characteristics, especially in aviation technology. The proposed approach is particularly important when working with the 3D-woven preforms, which are being characterized by an additional structural parameter, namely the number of the weft threads, or “layering”. The change in layering affects both physical and mechanical characteristics of the material, including permeability, which requires testing for each layering zone of the product. With the traditional approach, at least three samples per zone are required to build a permeability power-law dependence on the filling ratio, which, in the presence, for example, of ten layering zones, leads to the need for the 30 samples manufacturing and testing, and this is an extremely time-consuming task.

The proposed technique is based on comparing the results of both unsaturated and saturated permeability tests of the same sample, followed by the data recomputing using the proportionality coefficient. The experimental procedure includes six stages:

- the unsaturated permeability testing of a sample with the initial filling coefficient;
- saturated permeability testing the of the same sample with the same filling coefficient;
- conducting saturated permeability tests with several other filling coefficients (achieved by sample the thickness changing during one experiment);
- analyzing the results and determining permeability coefficients;
- determining interrelationship between the unsaturated and saturated permeability with the initial filling coefficient;
- recomputing the unsaturated permeability for the remaining filling coefficients through the found interrelation coefficient.

The key assumption of the technique consists in the assumption of the saturated and unsaturated permeability ratio constancy, independent on the preform filling ratio.

The technique was tested on the 3D-woven composite preforms with specialized equipment that allows simultaneous control of the impregnation process and change in sample thickness. The PMS-100 silicone oil was used as a model liquid. Position fixation of the flow front was being accomplished by the video recording through the transparent organic glass base with account for the optical distortion corrections. The experimental data processing was performed based on the Darcy’s law for stationary and non-stationary filtration.

Comparison of the results obtained by the proposed technique with the data from the standard tests, in which a separate sample is being used for each filling ration, demonstrated satisfactory convergence: the discrepancy between the values of the unsaturated permeability does not exceed 11.7%. With a filling ratio of 51.1%, the error was 4.9%, at 55.7% – 8.8%, and at 60.2% – 11.7%. The obtained accuracy is considered acceptable for engineering calculations of the impregnation processes.

The developed technique ensures significant reduction in the testing complexity and the need for cost intensive materials, which is especially important when working with the 3D-woven preforms characterized by a variety of structural parameters. The proposed approach may be applied to optimize the computed impregnation models during transfer molding, providing a more effective quality prediction of the manufactured composite products.

Further development of the technique involves its verification on a wider class of reinforcing fillers and binders, as well as studying the effect of the impregnation rate on the interrelation between the unsaturated and saturated permeability.

Keywords: unsaturated permeability, saturated permeability, filling coefficient of composite material, permeability testing methods, transfer molding, 3D-woven composite preforms, Darcy's law, binder impregnation

Financing: this work was financed by the Grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan provided to the higher education institutions, scientific and other organizations to support human resource development plans with regard to encouraging their research and academic staff to defend doctoral dissertations and conduct research activities (Agreement No. 15/2025-PD-KAI dated December 22, 2025).

For citation: Shabalin L.P., Puzyretskiy E.A., Khamidullin O.L., Salikhov N.F. A Technique for the Composite Materials Unsaturated Permeability Testing of Composite Preforms as a Function of the Filling Ratio. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(3):178–186. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188834>

List of Figures

Fig. 1. Equipment for testing the permeability and compactibility of composite material preforms:

a – isometric view; *b* – side view

Fig. 2. Sample impregnation strategy

Fig. 3. Observation diagram of the experiment on the study of the impregnation time

Fig. 4. Preform 40 in tooling, fiber impregnation of the base: *a* – prior to the impregnation starting;

b – at the moment of the preform impregnation

Fig. 5. Time dependence on the square of the distance traveled by the flow front

List of Tables

Table 1. Observed positions of the current front of the PMS-100

Table 2. A plan for conducting experiments to determine permeability

Table 3. The time intervals during which the PMS-100 will pass each of the marks for sample 40

Table 4. Values of saturated permeability coefficients (*K*) and unsaturated permeability Kuns of preforms

Table 5. Values of saturated permeability coefficients determined by various methods

Введение

Пропитка сухой преформы связующим — ответственный этап изготовления изделия из композиционного материала методом трансферного формования. Чтобы не допустить возникновения дефектов, таких как высокая пористость и остаточные сухие зоны, применяются расчетные методы для прогнозирования времени, необходимого для полной пропитки изделия, и исходя из полученных результатов, проводят оптимизацию режима. Такие дефекты, как пористость и сухие зоны, недопустимы, так как оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики изделия из композиционного материала [1–5]. Данное замечание особенно актуально для изделий, применяемых в авиационной технике. В работах [6, 7] особое внимание уделено задаче моделирования пропитки изделий авиационного назначения для оптимизации режима пропитки, а в источнике [8] — описанию технологии пропитки крыла МС-21 из композиционных материалов. Научно-исследовательской лаборатории АО «АэроКомпозит» потребовалось провести большое количество испытаний материалов, изделий и образцов элементов, чтобы определить оптимальные параметры технологии пропитки, которые обеспечивали бы

высокую точность изготовления изделий и эффективность процесса инфузии.

Для проведения расчетных исследований пропитки необходимо знать свойства преформы, наиболее важное из которых в данном случае — проницаемость. *Проницаемость* — это способность пористой среды пропускать жидкости или газы. Данный параметр является коэффициентом в законе Дарси.

Выделяют два типа проницаемости — ненасыщенную и насыщенную. Ненасыщенная проницаемость — это свойство сухой преформы, насыщенная же — свойство уже смоченной преформы, движение жидкости в которой является стационарным [8–15].

Для корректного прогнозирования процессов пропитки необходимо располагать достоверными данными о проницаемости преформ, однако ее экспериментальное определение сопряжено с рядом методических сложностей. В связи с этим в мировой практике накоплен значительный опыт разработки и совершенствования методов измерения проницаемости волокнистых армирующих материалов.

В работе [16] представлен обзор различных техник определения проницаемости армирующих преформ, проанализированы их достоинства и ограничения, а также подчеркнута необходимость

валидации экспериментальных методов теоретическими моделями.

В обзоре [17] рассмотрены различные экспериментальные методы измерения проницаемости волокнистых композитов, включая жидкостные и газовые способы для измерений в плоскости армирования и поперечном направлении, а также проанализированы проблемы, связанные с этими методами, и некоторые сопутствующие модели проницаемости.

В работе [18] предложена экспериментальная установка для измерения ненасыщенной проницаемости по толщине на основе распространения ультразвуковых волн в импульсном эхо-режиме, что позволяет проводить бесконтактный мониторинг фронта пропитки крупногабаритных панелей.

Значительным событием в области стандартизации стала публикация в 2023 году международного стандарта [19], регламентирующего экспериментальное определение проницаемости в третьем направлении композитных преформ, армированных волокнистыми наполнителями, пропитываемых трансферными методами. Данный стандарт в перспективе должен установить единые требования к оборудованию, методике и анализу данных.

В работе [20] представлены результаты сравнительного эксперимента по определению проницаемости композитных преформ. Несколько лабораторий измеряли проницаемость одних и тех же материалов по унифицированному протоколу, что позволило выявить основные источники расхождений между результатами (краевые эффекты, способ фиксации фронта, сжимаемость преформы) и предложить рекомендации по повышению воспроизводимости измерений.

Еще одной важной характеристикой преформы является объемный коэффициент наполнения — параметр, который определяет относительное объемное содержание волокна в преформе. Для проведения расчетов необходимо построение функциональной зависимости между проницаемостью и коэффициентом наполнения. В таком случае для построения одной функции требуется проведение как минимум трех экспериментов, так как чаще всего зависимость лучше описывается степенной функцией, поскольку на один тип материала приходится не менее трех преформ с различным коэффициентом наполнения. Зачастую необходимо выполнение работ по определению ненасыщенной проницаемости в условиях недостаточного количества материалов для проведения испытаний. Такая ситуация может возникать при работе с 3D-ткаными композитными преформами. 3D-тканые преформы имеют третий ключевой параметр — количество утковых нитей или «слойность». При изменении данного параметра могут

изменяться физико-механические характеристики материала: модуль упругости, модуль сдвига, проницаемость и так далее. В таком случае, если преформа изделия насчитывает десять зон слойности, то необходимо иметь как минимум 30 образцов преформы для проведения испытаний — по три образца на каждую зону. Изготовление такого количества образцов и проведение их испытаний может быть крайне трудозатратным. В связи с этим, необходима разработка методики, которая позволила бы сократить количество образцов и времени, необходимого для проведения испытаний.

Таким образом, проблема заключается в отсутствии простого и экономичного способа получения полной кривой ненасыщенной проницаемости от коэффициента наполнения для 3D-тканых преформ с различной слойностью при ограниченном количестве материала.

В данной работе предлагается методика, позволяющая получать кривую зависимости проницаемости от коэффициента наполнения, используя только один образец. Такая методика известна для случая насыщенной проницаемости. Она заключается в том, что через один и тот же образец в рамках одного эксперимента проводится жидкость с постоянным перепадом давления в зоне подачи и отвода [21]. В то же время в ходе эксперимента меняется толщина образца, тем самым меняется и коэффициент наполнения. Анализируя результаты эксперимента на различных временных участках, соответствующих различным коэффициентам наполнения, получают соответствующие им коэффициенты проницаемости.

Методы и эксперимент

Как известно, ненасыщенная проницаемость отличается от насыщенной тем, что в первом случае пропитывается еще сухая преформа и процесс пропитки является нестационарным ввиду того, что с течением фронта потока изменяется градиент давления. Одним из вариантов определения ненасыщенной проницаемости как функции коэффициента наполнения в рамках одного эксперимента является использование образца с градиентом коэффициента наполнения по длине. В данном случае требуется разработка уравнения, которое описывало бы данный процесс, либо построение соответствующей численной модели и дальнейший итерационный процесс по подбору подходящих коэффициентов проницаемости. Также, учитывая, что для определения коэффициента проницаемости при одной величине коэффициента наполнения нужен образец длиной как минимум 130 мм, то длина оснастки должна достигать не менее 420 мм.

В данной работе для определения проницаемости как функции коэффициента наполнения для одного эксперимента предлагается следующий подход:

1. Проведение испытания ненасыщенной проницаемости образца при коэффициенте наполнения v_1 .

2. Проведение испытания насыщенной проницаемости того же образца при коэффициенте наполнения v_1 .

3. Проведение испытания насыщенной проницаемости при коэффициентах наполнения $v_2, v_3, \dots, v_n$.

4. Анализ результатов испытаний и определение ненасыщенной и насыщенной проницаемости.

5. Определение соотношения между ненасыщенной и насыщенной проницаемостью при коэффициенте наполнения v_1 .

6. Пересчет ненасыщенной проницаемости при коэффициентах наполнения $v_2, v_3, \dots, v_n$ через коэффициент соотношения.

Преимуществом данной методики является ее простота, минимизация трудозатрат и количества требуемых образцов. Недостатком же является предположение о том, что соотношение между ненасыщенной проницаемостью и насыщенной

является константой, которая не зависит от коэффициента наполнения преформы.

Апробация методики проводилась в рамках испытания композитных 3D-тканых преформ. Устройство оснастки, используемой для испытаний, представлено на рис. 1.

Преформы 9 выкладывались в подготовленную металлическую рамку прямоугольной формы 3 и закрывались вакуумным мешком 10 с герметизирующей лентой 11 по периметру преформы. После чего по направляющим 4 устанавливалась верхняя металлическая плита, соединенная с пуансоном 2, которая была навешана на испытательное оборудование с целью обнуления ее веса. Через штуцеры 6 в оснастку подавалось силиконовое масло ПМС-100, которое протекало по каналам из инфузионной сетки. Стратегия пропитки при исследовании проницаемости в плоскости армирования приведена на рис. 2.

На оргстекле с внешней стороны были выполнены отметки на равном удалении друг от друга. Камера была расположена напротив нулевой отметки. Отраженный от преформы луч при прохождении через разные среды изменял угол. Из-за изменения угла отражения луча при прохождении через оргстекло силиконовое масло наблюдалось на отметке в момент, когда в реальности масло находилось

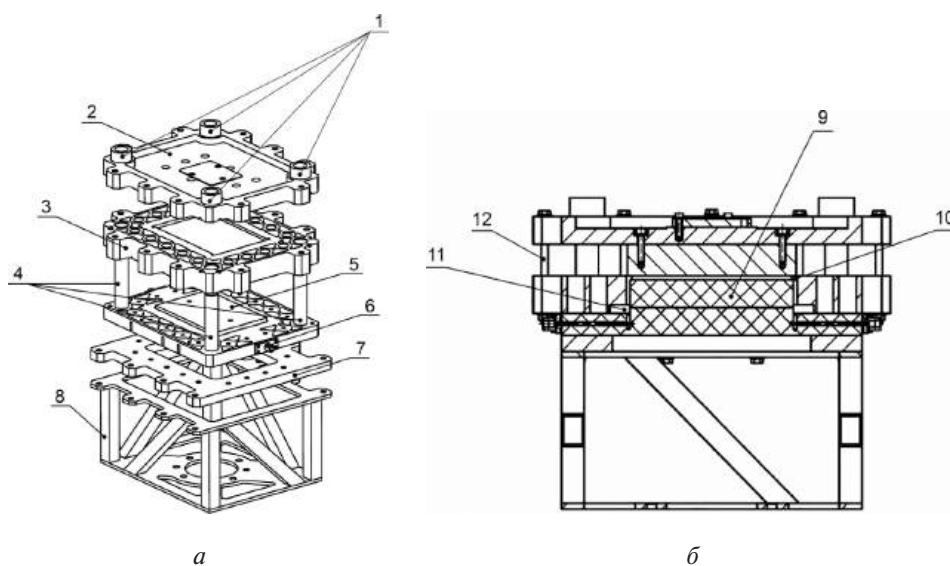


Рис. 1. Оснастка для испытания проницаемости и компактируемости преформ композиционного материала: *а* – вид в изометрии; *б* – вид сбоку:

- 1 – направляющие подшипники;
- 2 – верхняя металлическая плита, соединенная с пуансоном (сборный пуансон);
- 3 – металлическая рамка, в которую помещалась преформа;
- 4 – направляющие цилиндры;
- 5 – прозрачное основание из органического стекла;
- 6 – штуцеры для подачи и отвода силиконового масла ПМС-100;
- 7 – металлическая рамка; 8 – опорная металлическая рама;
- 9 – преформа; 10 – вакуумный мешок; 11 – герметизирующая лента;
- 12 – стягивающие болты

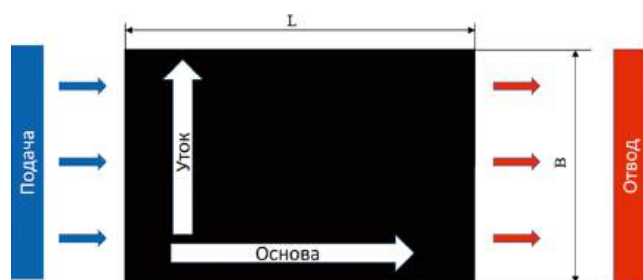


Рис. 2. Стратегия пропитки образца

на большем расстоянии от точки отсчета. Эти расстояния приведены в табл. 1.

Схема наблюдения эксперимента по исследованию времени пропитки приведена на рис. 3.

Испытание проницаемости 3D-тканых преформ

В табл. 2 приведен план проведения экспериментов по определению проницаемости преформ. Первые четыре эксперимента необходимы для реализации предложенного подхода, а три после-

Таблица 1. Наблюдаемые позиции фронта течения ПМС-100

№	S , м	S_1 , м
1	0,002	0,022
2	0,004	0,045
3	0,006	0,066
4	0,008	0,088
5	0,010	0,110
6	0,012	0,132

S – размеры расстояний отклонения от отметок, напротив которых проводилась видеозапись эксперимента с учетом кривизны линзы камеры и изменением угла отражения луча при прохождении через оргстекло;
 S_1 – расстояние от нулевой отметки с учетом отклонения угла отражения луча при прохождении через оргстекло

дующих выполнены традиционным способом и необходимы для сопоставления.

На рис. 4 приведен пример процесса пропитки сухой композитной преформы.

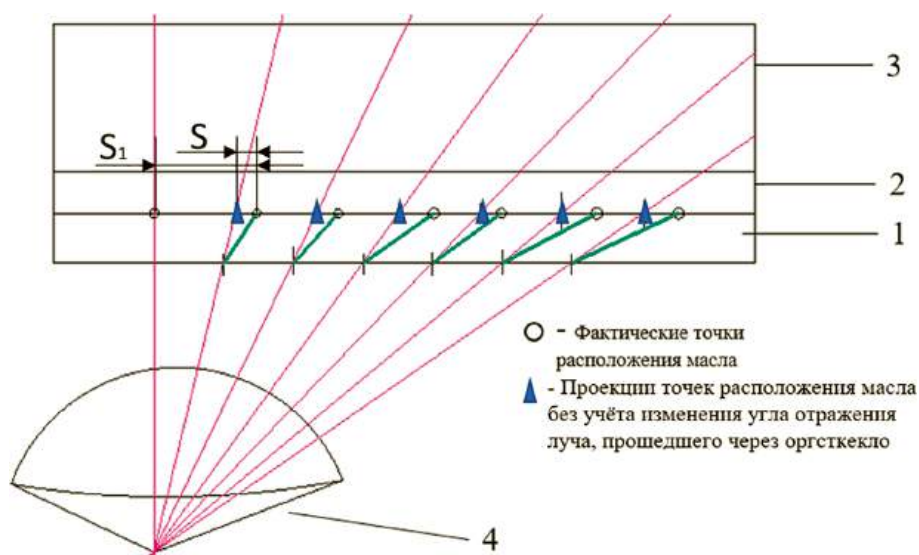


Рис. 3. Схема наблюдения эксперимента по исследованию времени пропитки:

1 – оргстекло; 2 – преформа, смачиваемая силиконовым маслом;
 3 – пуансон; 4 – записывающее устройство

Таблица 2. План проведения экспериментов по определению проницаемости

№	Слойность	Состояние преформы	Размер по основе, мм	Размер по утку, мм	Коэффициент наполнения ν , %
1	40	Ненасыщенная	130	100	51,4
2		Насыщенная			51,4
3		Насыщенная			55,4
4		Насыщенная			60,4
5		Ненасыщенная			51,6
6		Ненасыщенная			55,2
7		Ненасыщенная			60,1



а б

Рис. 4. Преформа 40 в оснастке, пропитка по волокну основы: а — перед началом пропитки; б — в момент пропитывания преформы

Время, в которое фронт течения ПМС-100 фиксировали у каждой отметки для данного образца, выведено в табл. 3.

Таблица 3. Временные промежутки, за которые ПМС-100 пройдет каждую из отметок для образца 40

№	Расстояние, м	Время, с
0	0	0
1	0,022	4
2	0,0445	23
3	0,066	50
4	0,0875	90
5	0,11	167

Расчет насыщенной и ненасыщенной проницаемости преформ

Значения проницаемости определялись по закону Дарси. Зависимость, описывающая объемный расход, имеет вид:

$$Q = \frac{KA\Delta p}{\mu L}, \quad (1)$$

где Q — объемный расход масла, м³/с; K — проницаемость материала, м²; A — площадь поперечного сечения образца, м²; Δp — разница давлений, Па; μ — вязкость масла, Па · с; L — длина преформы, м.

Проницаемость преформы можно определить по формуле

$$K = \frac{Q\mu L}{A\Delta p}. \quad (2)$$

Запишем уравнение для нестационарного процесса пропитки:

$$K_{uns} = \frac{\mu(1-\nu)}{2 \cdot \Delta p \cdot k}, \quad (3)$$

где ν — коэффициент наполнения преформ; k — величина прямо пропорциональная времени пропитки и обратно пропорциональная квадрату расстояния, пройденного фронтом течения масла (рис. 5).

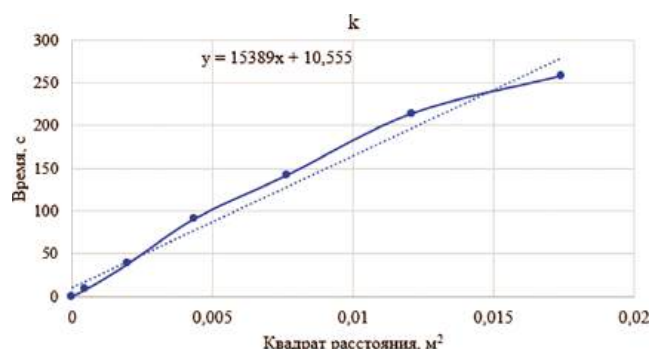


Рис. 5. График зависимости времени от квадрата расстояния, пройденного фронтом течения

Каждое испытание характеризуется своим коэффициентом наполнения ν . Для каждого коэффициента наполнения рассчитывается коэффициент проницаемости преформ.

Для определения ненасыщенной проницаемости преформ (эксперименты 2–4, см. табл. 2) был введен коэффициент пропорциональности:

$$p = \frac{K}{K_{uns}}. \quad (4)$$

Через коэффициент пропорциональности p , который был получен из уравнения (4), были рассчитаны значения ненасыщенной проницаемости преформ K_{uns} , соответствующие значениям проницаемости насыщенных преформ K . Полученные данные проницаемости сведены в единую таблицу (табл. 4), и на основе значений насыщенной и ненасыщенной проницаемости сформированы зависимости коэффициентов проницаемости от коэффициентов наполнения.

В табл. 5 приведено сопоставление ненасыщенной проницаемости преформы 40, определенной по предлагаемой методике с использованием одного образца и стандартным методом, при котором на каждый коэффициент наполнения используется один образец.

С учетом различий в полученных коэффициентах проницаемости при коэффициенте наполнения, равным 60,2%, можно заключить, что погрешность методики составляет не более 11,7%.

Выводы

В работе предложена и апробирована методика определения ненасыщенной проницаемости композитных преформ как функции коэффициента наполнения с использованием одного образца. Такой подход позволяет существенно снизить трудоемкость испытаний и потребность в большом количестве материалов, что особенно важно при работе с 3D-тканями преформами. Полученные

Таблица 4. Значения коэффициентов насыщенной (K) и ненасыщенной проницаемости K_{uns} преформ

Фактический коэффициент наполнения v , %	K , м ²	K_{uns} , м ²	p
51,4	$1,91 \cdot 10^{-11}$	$2,05 \cdot 10^{-11}$	0,93
55,4	$1,44 \cdot 10^{-11}$	$1,54 \cdot 10^{-11}$	—
60,4	$9,84 \cdot 10^{-12}$	$1,06 \cdot 10^{-11}$	—

Таблица 5. Значения коэффициентов насыщенной проницаемости, определенные различными методами

Фактический коэффициент наполнения v , %	Стандартная методика, м ²	Предлагаемая методика, м ²	Погрешность, %
51,1	$2,05 \cdot 10^{-11}$	$1,95 \cdot 10^{-11}$	4,9
55,7	$1,54 \cdot 10^{-11}$	$1,41 \cdot 10^{-11}$	8,8
60,2	$1,06 \cdot 10^{-11}$	$9,33 \cdot 10^{-12}$	11,7

результаты показали удовлетворительную сходимость со стандартными методами: расхождение значений проницаемости не превышает 11,7%. Методика может быть применена для оптимиза-

ции расчетных моделей процесса пропитки при трансферном формовании, обеспечивая более эффективное прогнозирование качества композитных изделий.

Конфликт интересов / Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no relevant conflict of interests

Список источников / References

1. Patel N, Lee LJ. Modeling of void formation and removal in liquid composite molding. Part I: Wettability analysis. *Polymer Composites*. 1996;17(1):96–103.
2. Patel N, Lee LJ. Modeling of void formation and removal in liquid composite molding. Part II: Model development and implementation. *Polymer Composites*. 1996;17(1):104–114.
3. Тюканько В.Ю., Ширина Т.В., Алимжанов О.Д. и др. Перспективы исследования смачивания ротационных композитов на основе полиолефинов // Актуальные проблемы естественных наук: Материалы XII Международной научно-практической конференции (12 апреля 2024). Петропавловск: СКУ им. М. Козыбаева, 2024. С. 471–475.
Tyukan'ko VYu, Shirina TV, Alimzhanov OD, et al. Prospects for research on wetting of rotational composites based on polyolefins. *Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy estestvennykh nauk" (April 12, 2024)*. Petropavlovsk: SKU im. M. Kozybaeva; 2024. p. 471–475. (In Russ.).
4. Ruiz E, Achim V, Soukane S, et al. Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites. *Composites Science and Technology*. 2006;66(3-4):475–486. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.06.004
5. Rohatgi V, Patel N, Lee LJ. Experimental investigation of flow-induced microvoids during impregnation of unidirectional stitched fiberglass mat. *Polymer Composites*. 1996;17(2):161–170. DOI: 10.1002/pc.10601
6. Пузырецкий Е.А., Донецкий К.И., Шабалин Л.П. и др. Теоретико-экспериментальное исследование вакуумного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей (ленты и ткани) и расплавленного эпоксидного связующего // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2(75). С. 109–121. DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-109-121
Puzyretskii EA, Donetskii KI, Shabalin LP, et al. Theoretical and experimental study of the vacuum forming of semipregs based on carbon fillers (tapes and fabric) and melting epoxy binding. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*. 2024;2(75):109–121. (In Russ.).
7. Puzyretskii EA, Shabalin LP, Savinov DV, et al. Modeling and Optimization of Manufacturing Processes of the Hybrid Composite Propeller Blade. *Russian Aeronautics*. 2022; 65(3):590–599. DOI: 10.3103/S1068799822030218
8. Величко А. МС-21 – лайнер с «черным» крылом. 2016. URL: <https://aviation21.ru/ms-21-lajner-s-chyornym-krylom/>
Velichko A. *MS-21 is a liner with a "black" wing*. 2016. (In Russ.).
9. Han KK, Lee CW, Rice BP. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. *Composites Science and Technology*. 2000;60(12):2435–2441. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00037-3

10. Tan H, Roy T, Pillai KM. Variations in unsaturated flow with flow direction in resin transfer molding: An experimental investigation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007;38(8):1872–1892. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.03.002
11. Naik NK, Sirisha M, Inani A. Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM. *Progress in Aerospace Sciences*. 2014;65:22–40. DOI: 10.1016/j.paerosci.2013.09.002
12. Shojaei A, Trochu F, Ghaffarian R, et al. An experimental study of saturated and unsaturated permeabilities in resin transfer molding based on unidirectional flow measurements. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2004;23(14):1515–1536. DOI: 10.1177/0731684404039787
13. Bréard J, Henzel Y, Trochu F, et al. Analysis of dynamic flows through porous media. Part I: Comparison between saturated and unsaturated flows in fibrous reinforcements. *Polymer Composites*. 2003;24(3):391–408. DOI: 10.1002/pc.10038
14. Michaud V. A review of non-saturated resin flow in liquid composite moulding processes. *Transport in Porous Media*. 2016;115(3):581–601. DOI: 10.1007/s11242-016-0629-7
15. Пузырецкий Е.А., Хамидуллин О.Л., Шабалин Л.П. и др. Методика испытания ненасыщенной проницаемости преформ композиционного материала на основе анализа объемного расхода жидкости // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 4. С. 95–102. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186671>
Puzyretskiy EA, Khamidullin OL, Shabalin LP, et al. A Technique for the Composite Materials Preforms Unsaturated Permeability Testing Based on the Voluminous Liquid Flow Rate Analysis. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(4):95–102. (In Russ.).
16. Patiño I, Vargas C, Vanegas J. Methods for permeability measurements of fibrous reinforced preforms. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 2014(72):186–202. DOI: 10.17533/udea.redin.15454
17. Sharma S, Siginer DA. Permeability Measurement Methods in Porous Media of Fiber Reinforced Composites. *Applied Mechanics Reviews*. 2010;63(2):020802-1 to 020802-19. DOI: 10.1115/1.4001047
18. Lionetto F, Montagna F, Maffezzoli A. Out-of-plane permeability evaluation of carbon fiber preforms by ultrasonic wave propagation. *Materials*. 2020; 13(12):2684. DOI: 10.3390/ma13122684
19. ISO/DIS 24823. *Test method for the experimental characterisation of out-of-plane permeability of fibrous reinforcements for liquid composite moulding*. Geneva: ISO, 2026.
20. Vernet N, Ruiz E, Advani S, et al. Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014;61(6):172–184. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.02.010
21. Dei Sommi A, Lionetto F, Maffezzoli A. An overview of the measurement of permeability of composite reinforcements. *Polymers*. 2023;15(3):728. DOI: 10.3390/polym15030728

Статья поступила в редакцию / Received 03.06.2026
Одобрена после рецензирования / Revised 11.06.2026
Принята к публикации / Accepted 01.07.2026