

Научная статья
УДК 620.1+629.7.01
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186671>
EDN: <https://www.elibrary.ru/KYMRCX>



Методика испытания ненасыщенной проницаемости преформ композиционного материала на основе анализа объемного расхода жидкости

Евгений Александрович Пузырецкий^{1✉}, Оскар Ленарович Хамидуллин², Леонид Павлович Шабалин³,
Кирилл Валерьевич Бурнашев⁴

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

¹ EAPuzyretskiy@kai.ru✉

² olkhamidullin@kai.ru

³ lpshabalin@kai.ru

⁴ KVBurnashev@kai.ru

Аннотация. Предложена новая методика определения ненасыщенной проницаемости преформы на основе данных об объемном расходе жидкости в процессе пропитки. Методика рассмотрена с теоретической и практической точки зрения. Представлены математическое описание методики и ее практическая реализация на примере испытания проницаемости композитной преформы. Результаты испытания показывают работоспособность методики и ее применимость для анализа результатов испытания ненасыщенной проницаемости.

Ключевые слова: методика испытания ненасыщенной проницаемости, метод одномерного стационарного потока, преформы композиционного материала

Финансирование: исследования выполнены в рамках Передовой инженерной школы «Комплексная авиационная инженерия» (Соглашение 075-15-2025-129).

Для цитирования: Пузырецкий Е.А., Хамидуллин О.Л., Шабалин Л.П., Бурнашев К.В. 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>

Original article

A Technique for the Composite Materials Preforms Unsaturated Permeability Testing Based on the Voluminous Liquid Flow Rate Analysis

Evgenii A. Puzyretskiy^{1✉}, Oskar L. Khamidullin², Leonid P. Shabalin³, Kirill V. Burnashev⁴

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

¹ EAPuzyretskiy@kai.ru✉

² olkhamidullin@kai.ru

³ lpshabalin@kai.ru

⁴ KVBurnashev@kai.ru

© Пузырецкий Е.А., Хамидуллин О.Л., Шабалин Л.П., Бурнашев К.В., 2025

Abstract

The article addresses the problem of the unsaturated porous media permeability determining, which is an important scientific and practical task with broad applications in the aerospace manufacturing, hydrogeology, geotechnology and environmental engineering.

The dry performs permeability determines the impregnation process success in the products manufacturing technology from the polymer composite materials by transfer molding techniques. Its value affects the completeness and uniformity of resin infiltration into the fiber structure and thus the absence of defects such as dry spots and voids, which reduce the mechanical strength of the final products. Under conditions of aerospace manufacturing, such defects are critically unacceptable as they may compromise the service life and reliability of structures.

Traditional approaches to the unsaturated permeability determining are based on tracking the liquid front coordinate, which separates the dry and impregnated zones. However, for materials with pronounced structural anisotropy (such as woven or 3D-preforms), the front shape is often appeared curved, while voids may form in the impregnated zone, which complicates accurate determining of the coordinate and leads to significant errors.

The article proposes the technique, which allows discarding the coordinate of the front measuring. The technique is based on the modified Darcy's law applicable to the unsaturated filtration, and envisages the permeability computing by the relationship between the introduced fluid volume, time, viscosity, pressure drop, porosity, and sample geometry. This approach minimizes the effect of impregnation defects and irregular front shapes, ensuring a more stable estimate of the integral filtration parameter.

The technique was tested on a woven composite preform with a fiber volume fraction of 55% and dimensions of $122 \times 146 \times 6.314$ mm. Silicone oil PMS100 with a dynamic viscosity of $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ was employed as the impregnating fluid. The impregnation was performed under a 5 mbar vacuum with a transparent tooling base, which allowed simultaneous recording of the liquid front movement and measuring the supplied oil mass. The volume of the inserted liquid was being computed by the known fluid density. The saturated permeability test was performed as well for the results comparison.

The following values were obtained:

- Unsaturated permeability by fluid volume: $K_{uns}^V = 2.0727 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$;
- Unsaturated permeability by front coordinate: $K_{uns}^x = 2.2808 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$;
- Saturated permeability: $K_{sat} = 1.58 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$.

The difference between the two unsaturated permeability values was 10.04%, while the difference between the unsaturated (by volume) and saturated permeability was 23.77%. This confirms that the proposed method ensures the accuracy comparable with the classical approaches. It is herewith simpler in realization, does not require labor intensive analysis of the front geometry and fits better for the anizotropic media.

Further testing on porous media with a predefined structure, including 3D-printed samples, is being planned to evaluate quantitatively the advantages of this method and expand its applicability in engineering practice.

Keywords: unsaturated permeability testing technique, one-dimensional stationary flow method, composite material preforms

Funding: the research was executed within the framework of the Advanced Engineering School “Integrated Aviation Engineering” (Agreement 075-15-2025-129).

For citation: Puzyretskiy E.A., Khamidullin O.L., Shabalin L.P., Burnashev K.V. 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.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186671>

List of Figures

Fig. 1. Example of flow patterns observed in optical, absorption, refraction and scattering images obtained for various reinforcement materials: *a* – Twill Glass (test No. 2); *b* – UD Carbon (test No. 4); *c* – Twill Flax (test No. 12); *d* – UD Flax (test No. 13) fabrics; *e* – the 3D-printed structure (test No. 14)

Fig. 2. Flow patterns imaged by the digital microscope. The scale in all images is the same [18]: *a* – test No. 1; *b* – test No. 2; *c* – test No. 3

Fig. 3. Flow flow front analysis example: the red arrow indicates the flow direction (top figure), and the red line (bottom figure) is the manual recognition of the flow. In the bottom figure, the straight black line is the average value of the flow front [19]

Fig. 4. A porous medium impregnation scheme

Fig. 5. Illustration of the proposed approach for the porous medium impregnation results analyzing:

a – actual state of the front and impregnated medium; *b* – the model state described by the volume of the injected liquid

Fig. 6. The nature of the liquid front motion in the preform

Fig. 7. The preform permeability test results

Введение

Определение ненасыщенной проницаемости пористых сред — задача с высокой практической значимостью в технологии авиационного производства, гидрогеологии, геотехнике и инженерной экологии. При изготовлении изделий из композиционных материалов трансферными методами формования проницаемость является критическим параметром преформы на этапе пропитки, так как оказывает значительное влияние на пропитываемость [1]. Успешная пропитка определяет качество изделия, сухие зоны и поры недопустимы, так как они оказывают негативное влияние на прочность [2–7]. Данное замечание особенно актуально применительно к изделиям из композиционных материалов, применяемым в авиационной технике. В таких работах, как [8–15], авторы уделяют особое внимание задаче моделирования пропитки изделий авиационного назначения для оптимизации режима пропитки. В источнике [16] показана актуальность развития безавтоклавных технологий пропитки заготовок из ПКМ. Научно-исследовательской лаборатории АО «АэроКомпозит» потребовалось провести большое количество испытаний материалов, изделий и образцов для того, чтобы определить оптимальные параметры технологии пропитки, которые обеспечивали бы высокую точность изготовления изделий и работоспособность процесса инфузии.

Существуют два принципиально отличающихся друг от друга метода определения проницаемости: в условиях стационарного потока жидкости и нестационарного. Выделяют два соответствующих типа проницаемости — насыщенную и ненасыщенную [8, 17]. В первом случае пористая среда уже полностью или частично пропитана жидкостью, во втором среда не смочена жидкостью. С точки зрения изготовления изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) особенно важна ненасыщенная проницаемость, так как пропитке подвергаются изначально сухие преформы.

При исследовании ненасыщенной проницаемости ключевым параметром оценки считается координата движения фронта, которая традиционно определяется как геометрическое положение границы между сухой и насыщенной зонами [8, 17].

В случае тканых композитных преформ и других пористых сред с ярко выраженной анизотропией структуры можно отметить сложность и неоднозначность в анализе результатов испытания ненасыщенной проницаемости [18–20]. Так, в работе [18] для преформ с тканой структурой можно отметить неоднозначный характер положения фронта движения жидкости (рис. 1 и 2).

На рис. 2 также четко видно формирование пустот в уже пропитанной области преформы,

которые заполняются по мере продвижения фронта потока. Это также вносит неоднозначность в определение координаты фронта потока. В работе [19] автор предлагает решение проблемы интерпретации позиции фронта путем разработки программного обеспечения, которое разбивает кривую фронта потока на множество точек и усредняет их координаты (рис. 3). Стоит отметить, что такой подход не исключает погрешности, связанной с пустотами, сформированными в уже пропитанной части пористой среды.

В работе [20] авторы также отмечают наличие проблемы интерпретации координаты фронта и предлагают байесовский подход к обратной задаче для оценки логарифма проницаемости в режиме реального времени по значениям давления и результатам наблюдения за движущейся границей жидкости.

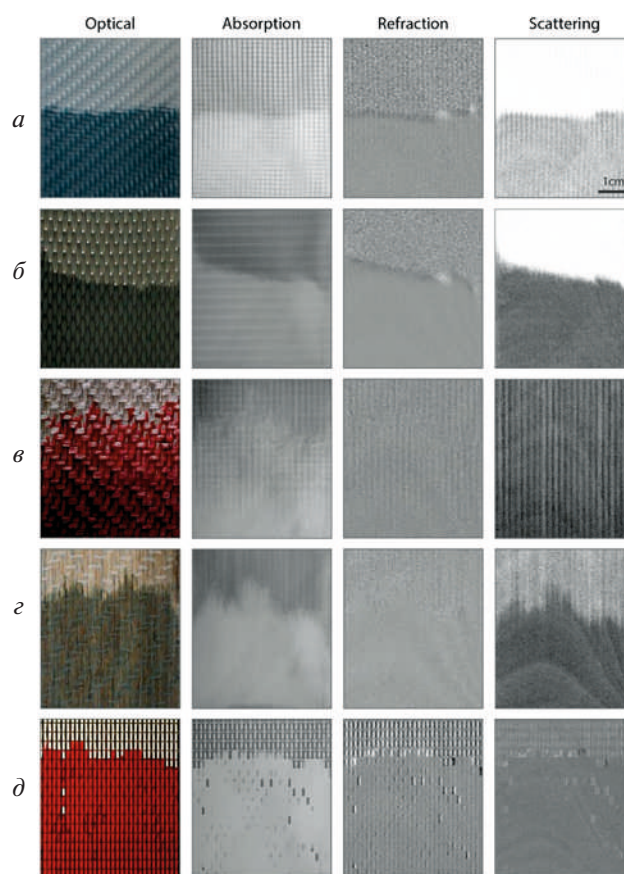
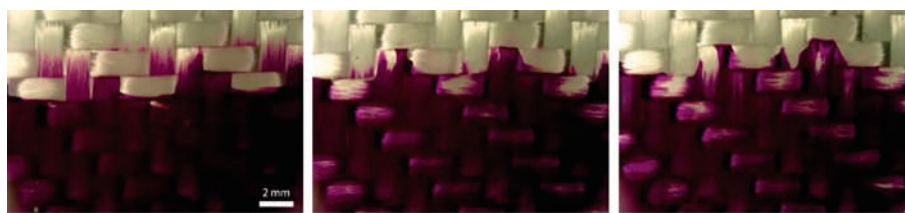


Рис. 1. Примеры схем течения, наблюдаемых на оптических, абсорбционных, преломляющих и рассеивающих изображениях, полученных для различных армирующих материалов [18]: а — Twill Glass (тест № 2); б — UD Carbon (тест № 4); в — Twill Flax (тест № 12); г — UD Flax (тест № 13); д — 3D-печатная структура (тест № 14)



а б в
Рис. 2. Картины течения, полученные с помощью цифрового микроскопа. Масштаб на всех снимках одинаковый [18]: а — тест № 1; б — тест № 2; в — тест № 3

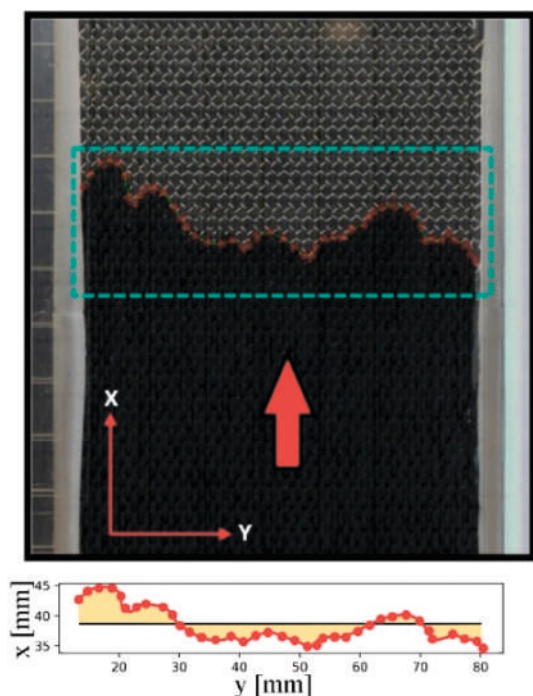


Рис. 3. Пример анализа фронта потока: красная стрелка показывает направление потока (верхний рисунок), а красная линия (нижний рисунок) — ручное распознавание потока. На нижнем рисунке прямая черная линия — среднее значение фронта потока [19]

Методы и эксперимент

Процесс фильтрации жидкостей или газов в пористых средах описывается с помощью закона Дарси. Данный закон в условиях действия силы тяжести записывается следующим образом:

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

В условиях отсутствия силы тяжести закон Дарси может быть записан следующим образом:

$$u = -\frac{K}{\mu} \text{grad } p. \quad (2)$$

Рассмотрим процесс пропитки изначально сухой (ненасыщенной) преформы и применим к нему

закон Дарси. Обратимся к схеме (рис. 4). На ней показан процесс пропитки сухой пористой среды в произвольный момент времени t . Разность давлений подачи и отвода жидкости поддерживается постоянной и равняется Δp . Координату положения фронта жидкости примем за x_f . Давление p_f фронта жидкости всегда равняется p_1 . Таким образом, в соответствии с законом Дарси, в той области, которая пропитана жидкостью, давление всегда распределяется линейно от p_0 до p_1 . Это значит, что градиент давления $\text{grad } p$ в процессе пропитки меняется от максимального к минимальному, а следовательно, скорость фильтрации и объемный расход жидкости меняются от максимального к минимальному значению, если разность давлений и площадь поперечного сечения образца постоянны.

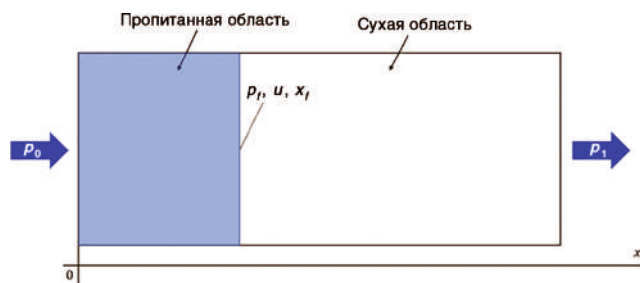


Рис. 4. Схема пропитки пористой среды

Для области, пропитанной жидкостью, запишем уравнение (2), учитывая, что скорость фильтрации может быть представлена как произведение проекции скорости движения частиц на ось, направленную вдоль потока, и коэффициента наполнения пористости среды:

$$v(1 - v) = -\text{grad } p \frac{K}{\mu}. \quad (3)$$

При этом

$$\text{grad } p = \frac{\Delta p}{x_f},$$

а скорость потока v может быть записана как производная координаты по времени:

$$v = \frac{dx_f}{dt}.$$

Тогда уравнение (3) может быть записано следующим образом:

$$\frac{dx_f}{dt}(1-v) = -\frac{\Delta p}{x_f} \frac{K}{\mu}.$$

Данное уравнение можно преобразовать в следующее:

$$x_f dx_f = -\Delta p \frac{K}{\mu(1-v)} dt.$$

Возьмем неопределенный интеграл левой и правой части и получим:

$$\frac{x_f^2}{2} = -\Delta p \frac{K}{\mu(1-v)} t. \quad (4)$$

Из (4) выразим K :

$$K = \frac{x_f^2}{t} \frac{\mu(1-v)}{2\Delta p}. \quad (5)$$

Координата фронта x_f определяет объем введенной жидкости. И вправду, объем введенной жидкости определяется координатой ее фронта и площадью поперечного сечения пористой среды следующим образом:

$$V = x_f(1-v)S, \quad (6)$$

где V – объем введенной жидкости, м^3 ; S – площадь поперечного сечения пористой среды, м^2 .

Подставляя (6) в (5), получаем:

$$K = -\frac{V^2}{t} \frac{\mu}{2\Delta p S^2(1-v)}. \quad (7)$$

С помощью формулы (7) можно рассчитать ненасыщенную проницаемость пористой среды. При этом требуется фиксация только объема введенной жидкости, фиксация координаты фронта не требуется. Также становится необходимым определение площади поперечного сечения пористой среды. Иллюстрация предлагаемого подхода приведена на рис. 5. В рамках предлагаемой методики формирующиеся на границе фронта и в пропитанных областях преформы поры игнорируются, так как предполагается, что весь объем введенной жидкости равномерно распределяется по объему пористой среды от координаты $X=0$ до наблюдаемой в данный момент времени.

Предположительно, проницаемость, определенная по предлагаемой методике, окажется очень близкой к насыщенной проницаемости, так как методика позволяет игнорировать образующиеся в

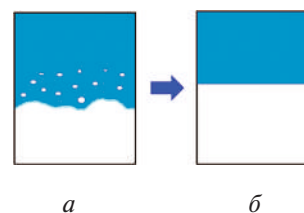


Рис. 5. Иллюстрация предлагаемого подхода к анализу результатов пропитки пористой среды:
а – фактическое состояние фронта и пропитываемой среды;
б – модельное состояние, описываемое через объем введенной жидкости

уже пропитанной области пористой среды пустоты. Тем не менее отличия скорее всего будут иметь место, так как образующиеся на границе фронта и в уже пропитанной области пористой среды пустоты:

- оказывают влияние на локальный градиент давления, что делает его характер нелинейным. Так, авторы [17] показали, что в начальный момент времени, когда скорость потока высокая и формирование пор минимально, давление меняется линейно и подчиняется закону Дарси, но в дальнейшем, когда происходит его замедление и формирование макропор, давление начинает меняться нелинейно;
- создают необходимость учета в уравнении сохранения массы параметров как воздуха, так и жидкости [17].

Результаты

Методика была опробована в рамках испытания композитной преформы с коэффициентом наполнения, равным 55%. Ширина, длина и толщина преформы составили 122 мм, 146 мм и 6,314 мм соответственно. Пропитка осуществлялась полиметилсилоксановой жидкостью ПМС100 [21], динамическая вязкость которой равна 100 мПа · с. Данная жидкость выбрана в качестве модельной для проведения эксперимента, так как она имеет вязкость, близкую к вязкости термореактивных связующих, применяемых при изготовлении изделий из ПКМ инфузионными методами. Также преимуществом данной жидкости является то, что она имеет хорошо известную и неизменную в условиях комнатной температуры кинематическую вязкость (соответствует маркировке). Пропитка осуществлялась под действием вакуума 5 мбар. Величина вакуума контролировалась с помощью размещенного в корпусе вакуумной ловушки виброустойчивого вакуумметра ТВ-320Р. Эксперимент проводился при комнатной температуре, температура контролировалась с помощью термометра. Схема пропитки – продольная, соответствующая рис. 4. Подача и отвод жидкости осуществлялись с помощью вспомогательных мате-

риалов: силиконовых шлангов для подвода и отвода к оснастке и вязаной технической ленты из полиэфира для подвода и отвода к преформе. Вакуумирование преформы производилось с помощью вакуумного мешка и вакуумного насоса. Основание используемой оснастки [22] – прозрачное. В процессе пропитки велась запись как движения фронта жидкости, так и массы емкости, из которой производилась ее подача. Изменение объема было вычислено через объемную плотность жидкости, которая составляет 967 кг/м^3 . По окончании пропитки преформы было дополнительно проведено испытание по определению насыщенной проницаемости. Объемный расход жидкости при пропитке насыщенной преформы составил $8,4686 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$. Стоит отметить неравномерное распределение координаты фронта связующего по ширине образца (рис. 6).

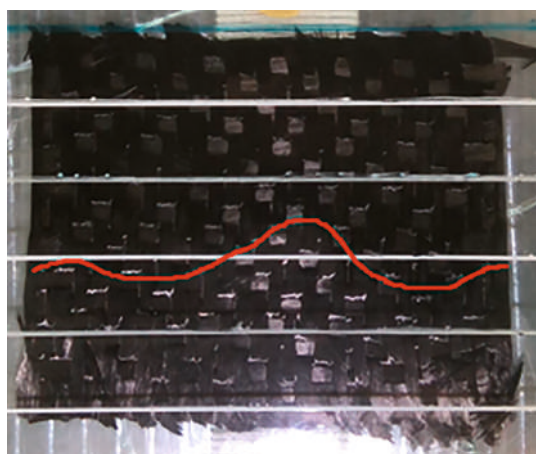


Рис. 6. Характер движения фронта жидкости в преформе

Получены следующие значения проницаемости (рис. 7):

- ненасыщенная проницаемость, вычисленная через объемный расход жидкости, $K_{uns}^V = 2,0727 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$;
- ненасыщенная проницаемость, вычисленная через координату фронта, $K_{uns}^x = 2,2808 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$;
- насыщенная проницаемость, $K_{sat} = 1,58 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$.

Результаты испытаний показывают, что разница между значениями ненасыщенной проницаемости составляет 10,04%. Ненасыщенная проницаемость, определенная через координату фронта, имеет большее значение. При этом насыщенная проницаемость имеет самое меньшее значение и отличается от ненасыщенной, определенной по объему, на 23,77 %.

Выводы

Предлагаемая методика демонстрирует свою пригодность для анализа результатов испытания ненасыщенной проницаемости пористых сред.

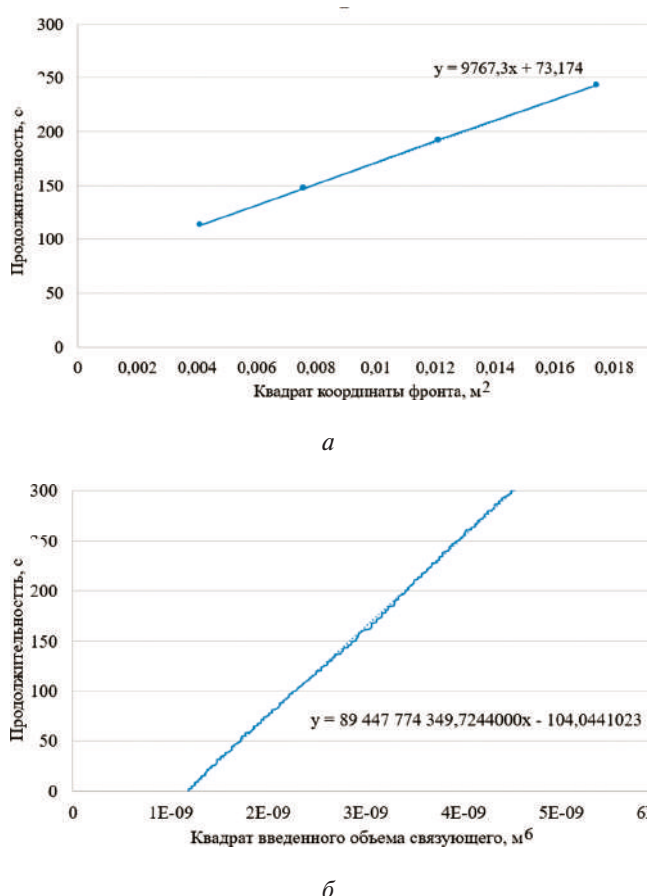


Рис. 7. Результаты испытания проницаемости преформы

Ее преимуществом перед традиционными является простота и более высокая точность ввиду отсутствия необходимости учета неидеальной границы фронта потока и формирующихся пустот в процессе пропитки. Целесообразно сравнить методику испытания проницаемости, представленную в данной работе, на объекте – пористой среде с заранее заданной структурой и, например, напечатанную на 3D-принтере. Такое сравнение позволит количественно оценить превосходство точности данной методики перед традиционной.

Список источников

1. Батраков В.В., Халиулин В.И., Константинов Д.Ю. Технология производства изделий из композитов. Трансферные методы формования: Учеб. пособие. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2018. С. 127.
2. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // Труды ВИАМ. 2016. № 6(42). С. 68-78. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8 EDN WBFNKN.
3. Kazano S., Osada T., Kobayashi S., et al. Experimental and analytical investigation on resin impregnation behavior in continuous carbon fiber reinforced thermoplastic polyimide

- composites // *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2018. Vol. 4. No. 1. DOI: 10.1186/s40759-018-0039-3.
4. Lionetto F., Montagna F., Maffezzoli A. Out-of-plane permeability evaluation of carbon fiber preforms by ultrasonic wave propagation // *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 12: 2684. DOI: 10.3390/ma13122684.
 5. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. С. 5.
 6. Mbakop R.S., Lebrun G., Brouillette F. Effect of compaction parameters on preform permeability and mechanical properties of unidirectional flax fiber composites // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 176. No. 1: 107083. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107083.
 7. Зигангиров Н.И. Анализ процесса пропитки лонжерона руля направления самолета из композиционных материалов // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сборник тезисов X Международной научно-практической конференции (08–12 апреля 2024; Красноярск)*. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2024. С. 413–414. EDN EOUJDU.
 8. Dei Sommi A., Lionetto F., Maffezzoli A. An Overview of the Measurement of Permeability of Composite Reinforcements // *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 3: 728. DOI: 10.3390/polym15030728.
 9. Пузырецкий Е.А., Донецкий К.И., Шабалин Л.П. и др. Теоретико-экспериментальное исследование вакуумного формирования 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 EDN EKPMKF.
 10. Пузырецкий Е.А., Шабалин Л.П., Савинов Д.В. и др. Моделирование и оптимизация процессов создания композитного тела гибридной лопасти тягового винта // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2022. № 3. С. 141–147. EDN ZURCZT.
 11. Федяев В.Л., Халиулин В.И., Сидоров И.Н. и др. Особенности пропитки семипрегов в производстве авиационных конструкций // *Вестник Московского авиационного института*. 2023. Т. 30. № 3. С. 69–77.
 12. Федяев В.Л., Халиулин В.И., Сидоров И.Н. и др. Капиллярная пропитка пакета семипрегов при изготовлении композитных элементов летательных аппаратов // *Вестник Московского авиационного института*. 2023. Т. 30. № 4. С. 68–78. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177608>.
 13. Бодунов Н.М., Халиулин В.И., Сидоров И.Н. и др. К вопросу о моделировании процесса пропитки преформы при трансферном формировании композитных изделий // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 1. С. 233–245. DOI: 10.34759/vst-2020-1-233-245.
 14. Бизюк А.Н., Ясинская Н.Н. Моделирование пропитки при формировании полимерных композиционных материалов // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2022. № 6(402). С. 215–220. DOI: 10.47367/0021-3497_2022_6_215 EDN SUSDTT.
 15. Хамидуллин О.Л., Мадиярова Г.М. Повышение качества изготовления ленточно-упругого шарнира из углепластика за счет компьютерного моделирования процессов пропитки и отверждения // *Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (08–10 августа 2018; Казань)*. Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2018. Т. 2. С. 307–312. EDN YTSSEX.
 16. Величко А. МС-21 — лайнер с «черным» крылом. 2016. URL: <https://aviation21.ru/ms-21-lajner-s-chyornym-krylom/>.
 17. Park C.H., Krawczak P. Unsaturated and Saturated Permeabilities of Fiber Reinforcement: Critics and Suggestions // *Frontiers in Materials*. 2015. Vol. 2: 38. DOI: 10.3389/fmats.2015.00038.
 18. Teixidó H., Caglar B., Revol V., et al. In-operando dynamic visualization of flow through porous preforms based on X-ray phase contrast imaging // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021. Vol. 149. No. 3: 106560. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106560.
 19. Bittrich L., Seuffert J., Dietrich S., et al. On the Resin Transfer Molding (RTM) Infiltration of Fiber-Reinforced Composites Made by Tailored Fiber Placement // *Polymers*. 2022. Vol. 14. No. 22: 4873. DOI: 10.3390/polym14224873.
 20. Iglesias M., Park M., Tretyakov M.V. Bayesian inversion in resin transfer molding // *Inverse Problems*. 2018. Vol. 34. No. 10. DOI: 10.1088/1361-6420/aad1cc.
 21. ГОСТ 13032-77. Жидкости полиметилсилоксановые. Технические условия. М.: Изд-во Стандартов, 1977. 18 с.
 22. Петров П.А., Пузырецкий Е.А., Газимов А.А. и др. Оснастка для измерения компактируемости, проницаемости преформ и изготовления элементарных образцов с учетом технологической наследственности. Патент RU226154U1. Бюл. № 15, 22.05.2024.

References

1. Batrakov BB, Khaliulin VI, Konstantinov DYU. *Technology of production of composite products. Transfer molding methods*. Kazan: KNITU-KAI; 2018. p. 127. (In Russ.).
2. Dushin MI, Donetskii KI, Karavaev RYU. Establishment of the causes of porosity formation in the manufacture of PCM. *Trudy VIAM*. 2016(6):68-78. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8 EDN WBFNKN (In Russ.).
3. Kazano S, Osada T, Kobayashi S, et al. Experimental and analytical investigation on resin impregnation behavior in continuous carbon fiber reinforced thermoplastic polyimide

- composites. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2018;4(1). DOI: 10.1186/s40759-018-0039-3.
4. 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.
 5. Mikhailin YuA. Structural polymer composite materials. 2nd ed. St. Petersburg: *Nauchnye osnovy i tekhnologii*; 2008. p. 5. (In Russ.).
 6. Mbakop RS, Lebrun G, Brouillette F. Effect of compaction parameters on preform permeability and mechanical properties of unidirectional flax fiber composites. *Composites Part B: Engineering*. 2019;176(1):107083. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107083.
 7. Zigangirov NI. Analysis of the impregnation of the aircraft rudder spar made of composite materials. *Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики" (April 08-12, 2024; Krasnoyarsk)*. Krasnoyarsk: SibGU im. M.F. Reshetneva; 2024. p. 413-414. EDN EOUJDU (In Russ.).
 8. 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.
 9. Puzyretskiy EA, Donetskiy 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. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2024(2):109-121. DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-109-121 EDN EKPMKF (In Russ.).
 10. Puzyretskii EA, Shabalin LP, Savinov DV. Modeling and optimization of manufacturing processes of the hybrid composite propeller blade. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2022(3):141-147. EDN ZURCZT (In Russ.).
 11. Fedyaev VL, Khaliulin VI, Sidorov IN, et al. Aspects of semipregs impregnation in aircraft parts production. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(3):69-77. (In Russ.).
 12. Fedyaev VL, Khaliulin VI, Sidorov IN, et al. Capillary impregnation of a semipreg stack in composite aircraft parts production. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(4):68-78. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177608>.
 13. Bodunov NM, Khaliulin VI, Sidorov IN, et al. On preform impregnation process simulation while transfer molding of composite products. *Aerospace MAI Journal*. 2020;27(1):233-245. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2020-1-233-245.
 14. Biziuk AN, Yasinskaya NN. Modeling of impregnation during the formation of polymer composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2022(6):215-220. DOI: 10.47367/0021-3497_2022_6_215 EDN SUSDTT.
 15. Khamidullin OL, Madiyarova GM. Improving the manufacturing quality of a carbon fiber elastic band joint through computer modeling of impregnation and curing processes. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossiiskoi aviakosmicheskoi otrasli" (August 08-10, 2018; Kazan)*. Kazan: KGTU im. AN. Tupoleva; 2018. Vol. 2. p. 307-312. EDN YTSSEX (In Russ.).
 16. Velichko A. *MC-21 is a liner with a "black" wing*. 2016. (In Russ.). URL: <https://aviation21.ru/ms-21-lajner-s-chyornym-krylom/>.
 17. Park CH, Krawczak P. Unsaturated and Saturated Permeabilities of Fiber Reinforcement: Critics and Suggestions. *Frontiers in Materials*. 2015;2:38. DOI: 10.3389/fmats.2015.00038.
 18. Teixidó H, Caglar B, Revol V, et al. In-operando dynamic visualization of flow through porous preforms based on X-ray phase contrast imaging. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021;149(3):106560. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106560.
 19. Bittrich L, Seuffert J, Dietrich S, et al. On the Resin Transfer Molding (RTM) Infiltration of Fiber-Reinforced Composites Made by Tailored Fiber Placement. *Polymers*. 2022;14(22):4873. DOI: 10.3390/polym14224873.
 20. Iglesias M, Park M, Tretyakov MV. Bayesian inversion in resin transfer molding. *Inverse Problems*. 2018;34(10). DOI: 10.1088/1361-6420/aad1cc
 21. *Polymethylsiloxane fluids. Specifications. State Standard 13032-77*. Moscow: Standarty; 1977. 18 p. (In Russ.).
 22. Petrov PA, Puzyretskii EA, Gazimov AA, et al. *Equipment for measuring compactibility, permeability of preforms and manufacturing of elementary samples, taking into account technological heredity*. Patent RU226154U1, 22.05.2024.

Статья поступила в редакцию / Received 21.08.2025
 Одобрена после рецензирования / Revised 10.10.2025
 Принята к публикации / Accepted 01.11.2025