
Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-61-80

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ ВОЛОКОН НА БАЗЕ АНАЛИЗА ПРИРОДОПОДОБНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.В. Копылов¹, В.Г. Прокопенков¹, А.В. Славин¹, А.О. Курносов¹

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

Аннотация. По результатам микроструктурных исследований рассмотрены особенности строения образцов стеклопластика на основе полых волокон до испытания на водопоглощение. Выполнен анализ изменения значений плотности, измеренных методом гидростатического взвешивания, для образцов стеклопластика на основе полых волокон в процессе длительного водопоглощения. Исследован процесс водопоглощения образцов стеклопластика на основе полых волокон на базе анализа природоподобных технологий – существующих в живой природе аналогичных систем и моделей водопоглощения.

Ключевые слова: стеклопластик, полые стекловолокна, водопоглощение, микроканалы, природоподобные технологии

Для цитирования: Копылов А.В., Прокопенков В.Г., Славин А.В., Курносов А.О. Исследование процесса водопоглощения стеклопластика на основе полых волокон на базе анализа природоподобных технологий // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-61-80.

Scientific article

STUDY OF WATER ABSORPTION PROCESS OF HOLLOW-FIBER FIBERGLASS BASED ON ANALYSIS OF NATURE-LIKE TECHNOLOGIES

A.V. Kopylov¹, V.G. Prokopenkov¹, A.V. Slavin¹, A.O. Kurnosov¹

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

Abstract. Based on the results of microstructural studies, the structural features of hollow-fiber fiberglass samples before their water absorption testing are considered. An analysis of changes in the density of hollow-fiber fiberglass samples measured by hydrostatic weighing is performed depending on the number of days during long-term water absorption. A study of the water absorption process of hollow-fiber fiberglass samples is performed based on the analysis of nature-like technologies – similar systems and models of water absorption that exist in nature.

Keywords: fiberglass, hollow glass fibers, water absorption, microchannels, nature-like technologies

For citation: Kopylov A.V., Prokopenkov V.G., Slavin A.V., Kurnosov A.O. Study of water absorption process of hollow-fiber fiberglass based on analysis of nature-like technologies. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-61-80.

Введение

Для оценки весовой эффективности и удельных прочностных характеристик стеклопластиков конструкционного и радиотехнического назначения необходимо определить их плотность. Предпочтительным методом определения плотности стеклопластиков является метод гидростатического взвешивания, поскольку позволяет учитывать влияние пор внутри материала, в отличие от метода обмера и взвешивания.

При этом плотность образцов стеклопластиков на основе полых волокон, измеренная методом гидростатического взвешивания, имеет более высокие значения по сравнению с методом обмера и взвешивания в связи с заполнением свободного воздушного объема измерительной жидкостью. При длительной выдержке образцов стеклопластиков в воде и последующем измерении плотности методом гидростатического взвешивания воздух со временем выходит из полого пространства волокон, которое заполняется водой. Как следствие, в процессе дальнейшего самопроизвольного водопоглощения полыми стекловолокнами плотность образца стеклопластика продолжает увеличиваться.

В области создания полимерных композиционных материалов (ПКМ) и изделий на их основе, в частности для судостроения, рассматриваются проблемы водопоглощения стеклопластика и других ПКМ, но только на основе сплошных волокон [1, 2], а не полых. В научно-технической литературе, например в работе [1], представлены результаты испытания образцов стеклопластика и других ПКМ на основе сплошных волокон в водной среде, крупные поры которых, например в связующем, имеют линейные размеры до 1000 мкм (1 мм), что несоизмеримо меньше, чем длины полых стекловолокон в образце стеклопластика (≥ 20 мм).

Анализ моделей создания ПКМ и изделий на их основе, использующих подобный водопоглощению полыми системами механизм, показал, что в основу процесса пропитки под давлением (Resin Transfer Molding – RTM) положена теория фильтрации вязких жидкостей в пористой среде, разработанная в 1856 г. французским инженером Дарси на основе экспериментальных исследований прохождения жидкости через песчаные грунты (фильтры) [3]. Согласно данной теории, основной параметр процесса – это разность давлений жидкости при входе и выходе из пористого слоя [3–7]. Самопроизвольное прохождение жидкости через грунты (фильтры), в том числе через песчаные грунты, горные породы и др., рассматривается в подземной гидромеханике [8–13]. Другие теории самопроизвольного водопоглощения, подобные теории фильтрации вязких жидкостей в пористой среде, применяются в других науках, в частности в биологических и сельскохозяйственных [14, 15].

Использование в качестве моделей водопоглощения полыми системами непосредственно процессов RTM или Light RTM (с помощью вакуума) нецелесообразно в связи с их управляемостью в лабораторных условиях, тогда как водопоглощение в образцах стеклопластика на основе полых волокон происходит самопроизвольно. Так, при инъекции полимерной смолы методом RTM или Light RTM перепады давления и зоны разрежения создаются с использованием оборудования и человеческого влияния [3, 16–24]. Кроме того, в данных моделях в качестве рабочего тела рассматривается полимерная смола, и невозможно учесть водородные и водородно-кислородные связи, которые формируют силу молекулярного сцепления и, соответственно, поверхностное натяжение воды.

Возникает ряд научных проблемных вопросов и задач, которые определяют актуальность темы исследования:

- научное обоснование причины самопроизвольного водопоглощения при проникновении воды и заполнении ею полого пространства волокон образца стеклопластика;
- разработка математической модели для определения скорости потока воды, проходящего через сквозные отверстия полых стекловолокон;
- научное обоснование процессов, происходящих в образце стеклопластика при длительном водопоглощении полыми стекловолокнами.

На основе анализа научно-технической литературы в области других наук необходимо осуществить выбор аналогичных систем, которые удовлетворяют ряду требований:

- наличие сквозных полых микроканалов (трубок) диаметром <10 мкм и длиной ≥ 20 мм, заполненных воздухом до водопоглощения;
- перепад давления потока воды в полых микроканалах (трубках) в процессе водопоглощения, который создается самопроизвольно в естественных условиях без внешнего вмешательства;
- рабочая среда – поток воды и воздух (кислород), находящийся в полости микроканалов (трубок);
- сила молекулярного сцепления воды, создающая поверхностное натяжение и удерживающая молекулы воды вместе. Все молекулы воды связаны друг с другом водородными и водородно-кислородными связями. Каждый атом водорода в молекуле воды образует крепкую связь с атомами кислорода соседних молекул, находящихся в воздушной полости микроканалов (трубок);
- кинематическая вязкость воды;
- силы трения воды как между ее слоями, так и на границе раздела «вода–внутренняя поверхность полых микроканалов (трубок)» вследствие вязкости воды.

Анализ научно-технической литературы [8–15] в области подземной гидромеханики, биологических, сельскохозяйственных и других наук показал, что представленному ряду требований удовлетворяют системы микроканалов грунтов и горных пород или стволов хвойных деревьев, где в естественных условиях без человеческого вмешательства моделируются данные параметры потока воды, проходящего через микроканалы диаметром <10 мкм.

Цель данной работы – исследование процесса водопоглощения стеклопластика на основе полых волокон с использованием результатов анализа природоподобных технологий – существующих в живой природе аналогичных систем и моделей водопоглощения.

Объекты исследования, описание их структуры и микроструктуры, другие исходные данные

Для микроструктурных исследований, проведенных на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, до и после испытаний на водопоглощение, выбраны образцы стеклопластика на основе расплавленного эпоксидного связующего и ткани из стеклянных крученых комплексных нитей на основе полых волокон. Результаты проведения металлографического анализа шлифа образца стеклопластика представлены на рис. 1. Полые стекловолокна являются сквозными.

Результаты микроструктурных исследований поверхности шлифа образцов препрега стеклопластика на основе расплавленного эпоксидного связующего и ткани из стеклянных крученых комплексных нитей на основе полых волокон приведены на рис. 2, а. Сечение нити на основе полых стекловолокон, включающее две окружности (внешнюю и внутреннюю), приведено на рис. 2, б. Площадь внутренней окружности заполнена

воздухом (выделена черным цветом на рис. 2). Площадь кольца, сформированного длинами внешней и внутренней окружности, заполнена стекловолокном (выделена серым цветом на рис. 2). Номинальный диаметр нити составляет 11 мкм, номинальное значение коэффициента капиллярности K равно 0,5. Диаметр внутренней окружности, заполненной воздухом, вычисляется по формуле

$$d_{\text{внут}} = Kd_{\text{внеш}},$$

где $d_{\text{внут}}$, $d_{\text{внеш}}$ – диаметры внутренней и внешней окружности; K – коэффициент капиллярности.

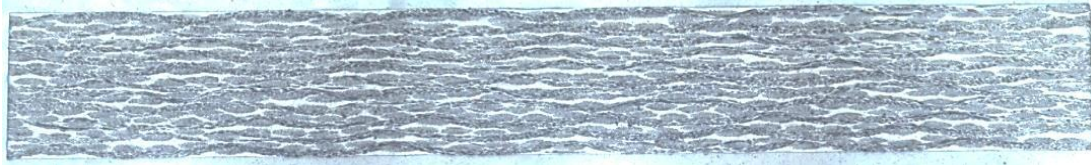


Рис. 1. Результаты проведения металлографического анализа шлифа образца стеклопластика на основе расплавленного эпоксидного связующего и ткани из стеклянных крученых комплексных нитей на основе полых волокон при увеличении $\times 50$

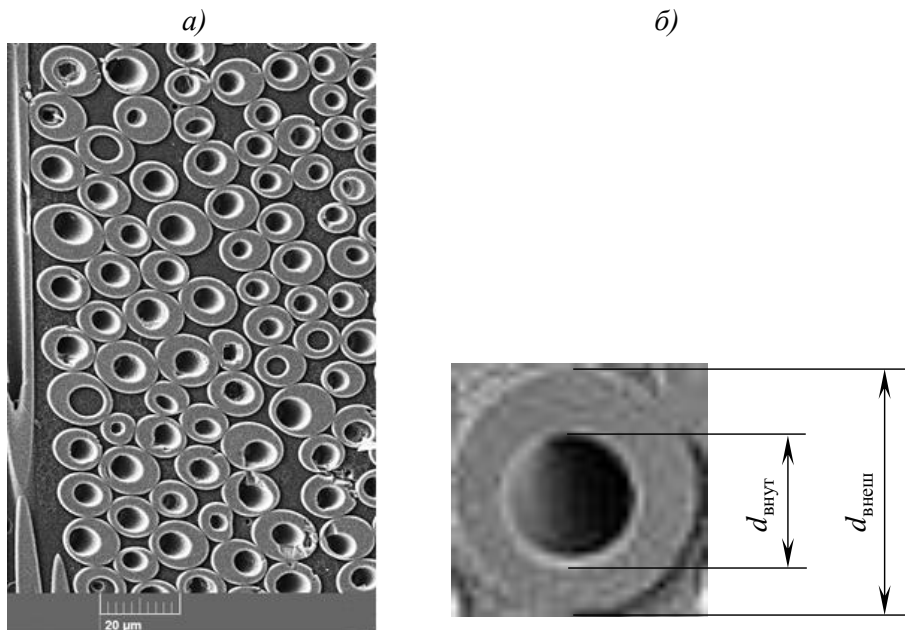


Рис. 2. Результаты исследований образцов препрега стеклопластика на основе расплавленного эпоксидного связующего и ткани из стеклянных крученых комплексных нитей на основе полых волокон: *а* – микроструктура поверхности шлифа; *б* – размеры кольца стекловолокна, сформированного длинами внешней и внутренней окружности

Номинальный диаметр окружности полого стекловолокна, заполненной воздухом, равен 5,5 мкм.

Микроструктурные исследования торцов волокон стеклоткани (рис. 3) показали, что волокна полые, округлой формы. Диаметр волокна находится в диапазоне от 7,7 до 12,5 мкм, диаметр внутренней полости в стеклянных волокнах варьирует от 2,1 до 5,5 мкм.

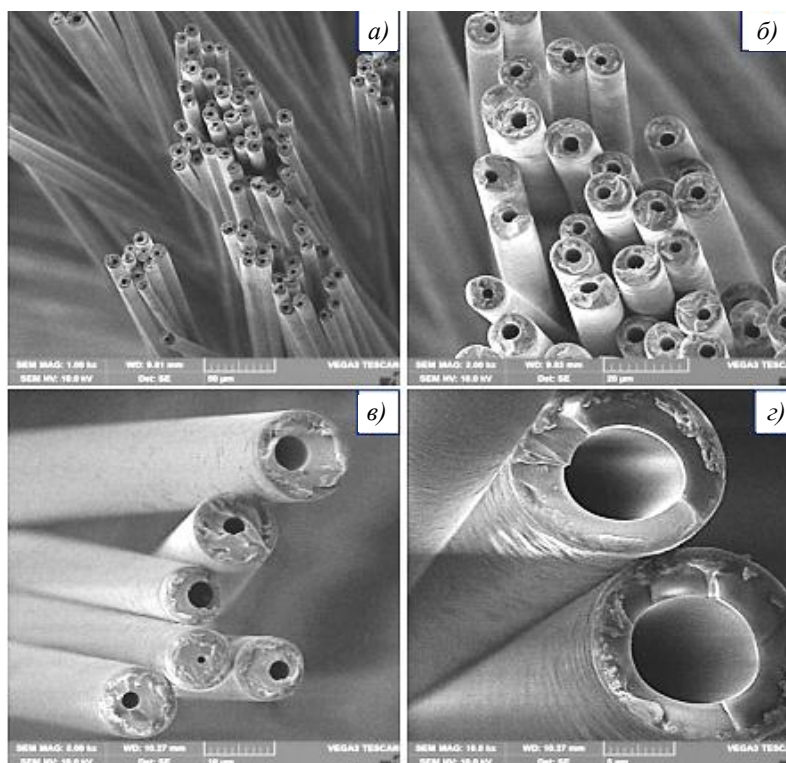


Рис. 3. Микроструктура поверхности среза стеклянных волокон ткани из стеклянных крученых комплексных нитей на основе полых волокон при увеличениях $\times 1000$ (а), $\times 3000$ (б), $\times 5000$ (в) и $\times 10000$ (г)

Плотность образцов стеклопластика определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ Р 57713–2017, а также методом обмера и взвешивания по ГОСТ Р 56682–2015 (п. 8.2, метод II).

Плотность стеклопластика методом гидростатического взвешивания вычисляли по формуле

$$\rho = \rho_0 \frac{m}{m - m_1},$$

где ρ – плотность воды при комнатной температуре; m и m_1 – масса образца на воздухе и в воде.

Плотность стеклопластика методом обмера и взвешивания определяли по формуле

$$\rho = \frac{m}{Ah},$$

где m , A , h – масса, площадь и толщина образца.

Выдержку образцов стеклопластика в воде проводили по ГОСТ 4650–2014 (метод 1).

Исследование массы и плотности образцов стеклопластика на основе полых волокон после длительного водопоглощения

Изменение значений массы и плотности, определенных методом гидростатического взвешивания, для образцов стеклопластика на основе расплавного эпоксидного

связующего и ткани из стеклянных крученых комплексных нитей из полых волокон в процессе длительного водопоглощения представлено на рис. 4.

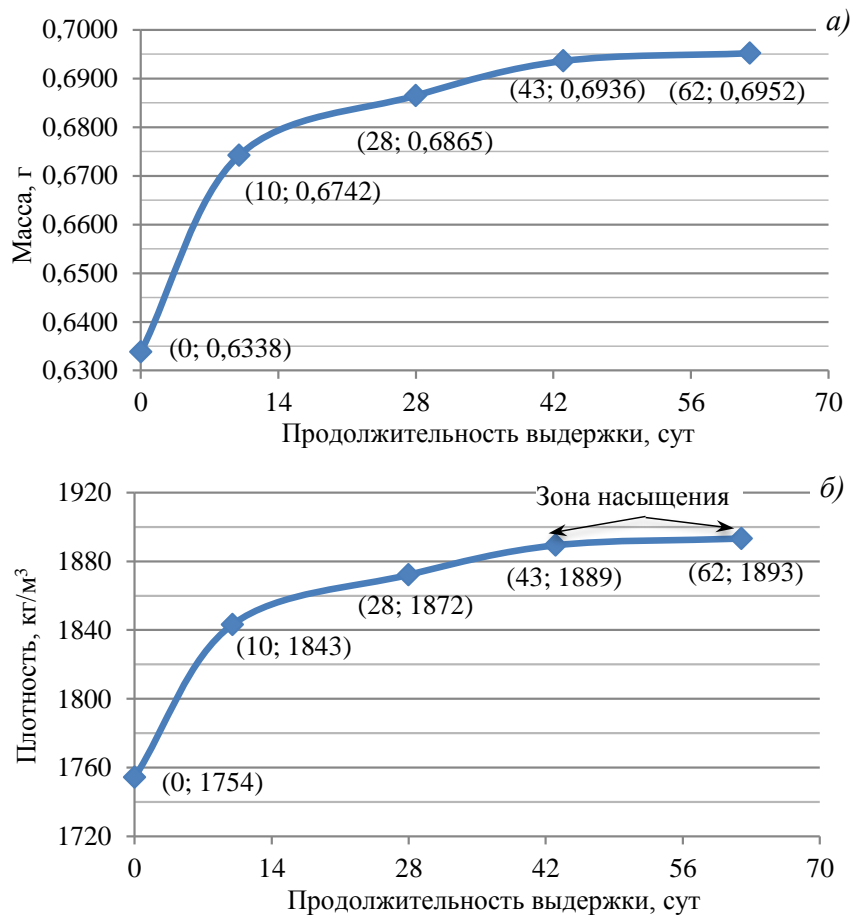


Рис. 4. Зависимости массы (а) и плотности (б) от продолжительности водопоглощения стеклопластика на основе расплавленного эпоксидного связующего и ткани из стеклянных крученых комплексных нитей на основе полых волокон

Определено, что плотность образцов стеклопластиков на основе полых волокон при измерении методом гидростатического взвешивания существенно выше, чем при измерении методом обмера и взвешивания. Анализ зависимостей изменения значений плотности образцов стеклопластика от продолжительности выдержки в воде (рис. 4, б) показал, что данные кривые близки к логарифмическому тренду. В течение первых 43 сут плотность интенсивно увеличивается при попытке достичь плато, что предположительно связано с выходом воздуха из полости стекловолокна. При дальнейшем водопоглощении образцов стеклопластика (до 62 сут) в результате существенного заполнения водой полостей стекловолокон остаточный воздух стремится полностью выйти, наблюдается зона насыщения при существенном замедлении возрастания плотности образцов, которое при этом не прекращается. Угловой коэффициент, характеризующий скорость изменения функции плотности, приближается к нулю, и плотность асимптотически стремится к постоянному значению.

Аппроксимация с помощью логарифмического тренда замедляющегося возрастания временного ряда значений плотности от продолжительности выдержки в воде представлена на рис. 5.



Рис. 5. Аппроксимация логарифмическим трендом зависимости плотности от продолжительности выдержки в воде стеклопластика на основе расплавленного эпоксидного связующего и ткани из стеклянных крученых комплексных нитей на основе полых волокон

Природоподобные системы и модели водопроницающих микроканалов и их использование в исследовании процесса самопроизвольного водопоглощения стеклопластика на основе полых стекловолокон

Анализ научно-технической литературы [8–15] показал, что для исследования самопроизвольного водопоглощения стеклопластика на основе полых волокон необходимо рассмотреть природоподобные системы и модели грунтов, горных пород и стволов хвойных деревьев с микроканалами диаметром <10 мкм.

Подземная гидромеханика – наука о фильтрации жидкостей, газов и их смесей в пористых и трещиноватых горных породах. Объектом изучения подземной гидромеханики является фильтрационный поток – поток жидкости (газа, газожидкостной смеси) в поровой или трещиноватой среде [8].

По размерам (поперечным относительно направления движения флюида) поры горных пород делятся на сверхкапиллярные (>508,0 мкм), капиллярные (0,2–508,0 мкм) и субкапиллярные (<0,2 мкм). В сверхкапиллярных порах движение жидкости подчинено законам гидравлики (например, осуществляется свободное перемещение), в капиллярных порах движение жидкости затруднено из-за проявления сил молекулярного сцепления [8].

Можно предположить, что при погружении образца стеклопластика в воду самопроизвольное (свободное) перемещение (диффузия) воды внутри (вдоль) микроканала полого стекловолокна диаметром 5,5 мкм по законам гидравлики исключается, так как данное значение диаметра попадает в диапазон значений капиллярных пор. Движение жидкости затруднено или исключено из-за проявления сил молекулярного сцепления, полое пространство стекловолокон заполняется водой по другим механизмам водопоглощения.

Композиционные материалы быстрее поглощают воду вдоль оси армирующих волокон, потому что пучки волокон, как правило, полностью не смачиваются и легко пропускают воду за счет капиллярного эффекта [2].

Кроме того, можно допустить, что подземная вода (жидкость) может только с обоих торцов частично смачивать сквозные отверстия капиллярных пор горных пород размером 0,2–508,0 мкм, не проходя внутрь их микроканалов, что может быть идентично частичному смачиванию водой отверстий сквозных полых стекловолокон.

В подземной гидромеханике горные породы подразделяются на проницаемые и плотные. К проницаемым принято относить породы, способные вмещать и пропускать жидкости при перепаде давления. Такие породы называют коллекторами [8].

Для построения абстрактной модели образца стеклопластика с определенным количеством полых стеклянных трубок с внутренним диаметром 5,5 мкм, имеющих определенную длину, плотно упакованных и не подвергающихся деформации, можно рассмотреть модель идеального грунта.

Идеальный грунт – модель пористой среды, поровые каналы которой представляют собой пучок тонких цилиндрических трубок (капилляров) с параллельными осями (рис. 6, а) [8]. Можно рассмотреть модель фиктивного грунта (рис. 6, б) с углом укладки шарообразных частиц θ .

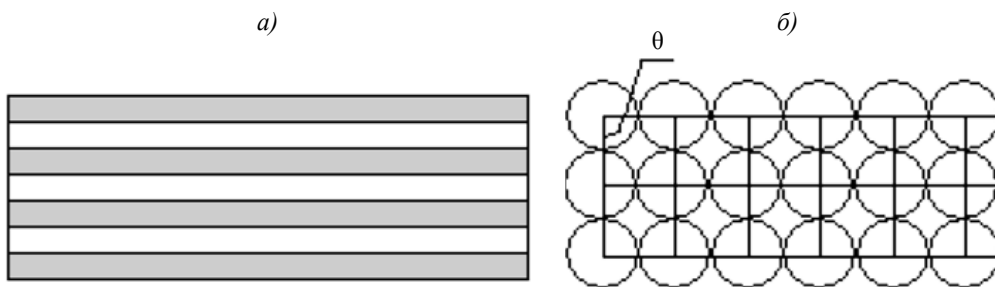


Рис. 6. Схемы идеального грунта (профиль) в виде полых цилиндрических трубок (а) и фиктивного грунта (торцевая поверхность) в виде шариков одинакового диаметра (б): θ – угол укладки шарообразных частиц [8]

В отличие от движения жидкостей и газов по трубам и в открытых руслах, фильтрация имеет свои особенности: малые значения поперечных размеров поровых каналов и скорости движения жидкости; значительное влияние сил трения вследствие вязкости жидкости и больших значений площади поверхности стенок поровых каналов [8].

Частным случаем двумерного фильтрационного потока $w = f(x, y)$, где w – скорость фильтрации, x и y – координаты, является плоскорадиальный фильтрационный поток $w = f(r)$, когда выполняется следующее условие: вектор скорости фильтрации является функцией расстояния r до некоторой точки (рис. 7). Такие точки называются стоками (при движении жидкости от периферии к центру) или источниками (при движении от центра к периферии) [8]. В данном случае вода движется от внутренней поверхности стенки (периферии) к центру.

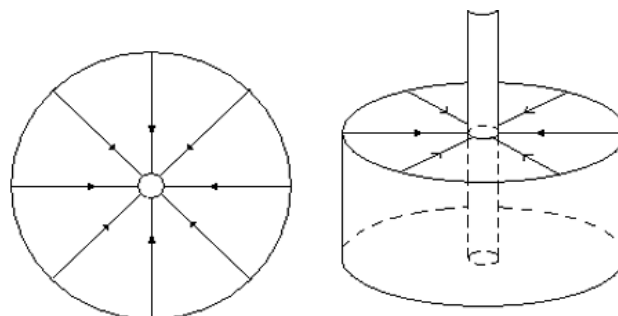


Рис. 7. Схема плоскорадиального потока воды через сквозную капиллярную пору длиной ≥ 20 мм (вид сбоку) при движении воды от внутренней поверхности стенки (периферии) к центру [8]

Механизм водопоглощения полыми стекловолокнами, представляющими собой тонкие полые цилиндрические трубки в идеальной модели пористой среды, также аналогичен механизму притока жидкости к скважине, которая является гидродинамически несовершенной по степени вскрытия пласта, где линии тока жидкости искривляются (рис. 8) [8].

Можно предположить, что сквозные капиллярные поры горных пород диаметром 0,2–508,0 мкм представляют собой совокупность воронкообразных отверстий, работающих на сток с помощью механизма эжектирования или подсоса воды по спиральной траектории. Возможно, данное эжектирование (подсос) жидкости в полость капиллярных пор горных пород напрямую связано с изменением поперечного диаметра поры и, соответственно, с изменяемой конфигурацией внутренней поверхности вдоль длины поры.

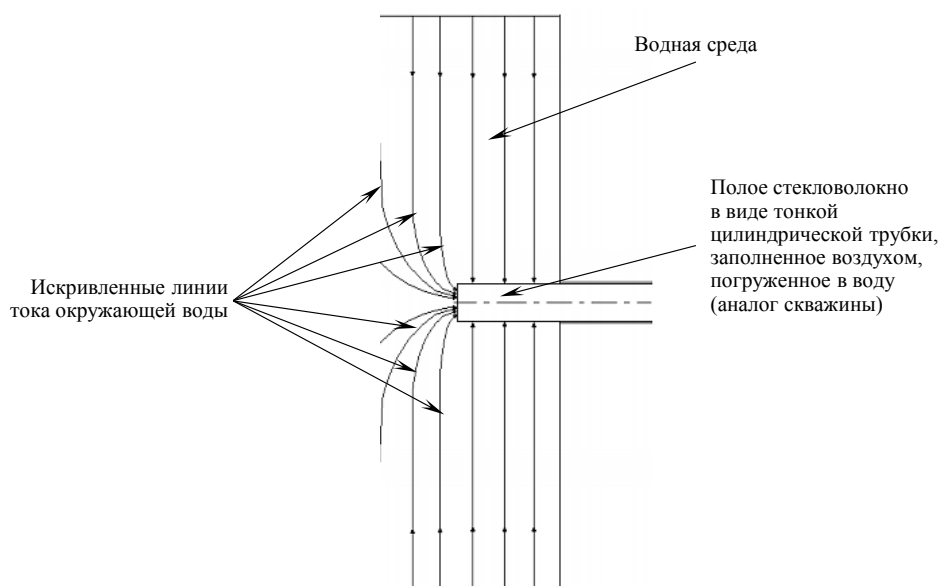


Рис. 8. Схема притока воды к тонкой полой цилиндрической трубке [8]

Возможно, конфигурация полости стекловолокна (рис. 9, *а*) представляет собой некое подобие сопла Лаваля (рис. 9, *б*) [25] с усеченными конусами: диаметр торцов составляет 5–10 мкм, а вдоль длины микроканала диаметр поперечного сечения и справа, и слева плавно уменьшается.

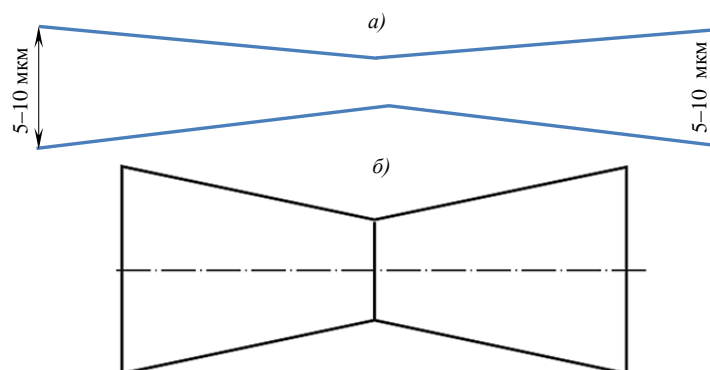


Рис. 9. Предполагаемая конфигурация полости сквозного стекловолокна вдоль длины (*а*) и схема сопла Лаваля (*б*) [25]

В полой стекловолокне предположительно осуществляется двухстороннее водопоглощение, где внутренние сквозные отверстия и слева, и справа являются входными с последующим плавным сужением диаметра вдоль канала (рис. 10 и 11). Предположительно формируется двухсторонняя воронка или двухсторонний сток с отрицательной дивергенцией, т. е. подсос воды внутрь полого стекловолокна осуществляется через левое и правое отверстия.

Только методом компьютерной томографии с определенным разрешением можно определить в разных сечениях значения диаметров $d_1, d_2, d_3 \dots d_n$ внутренней поверхности полого стекловолокна с целью анализа изменения конфигурации вдоль микроканала (рис. 12).

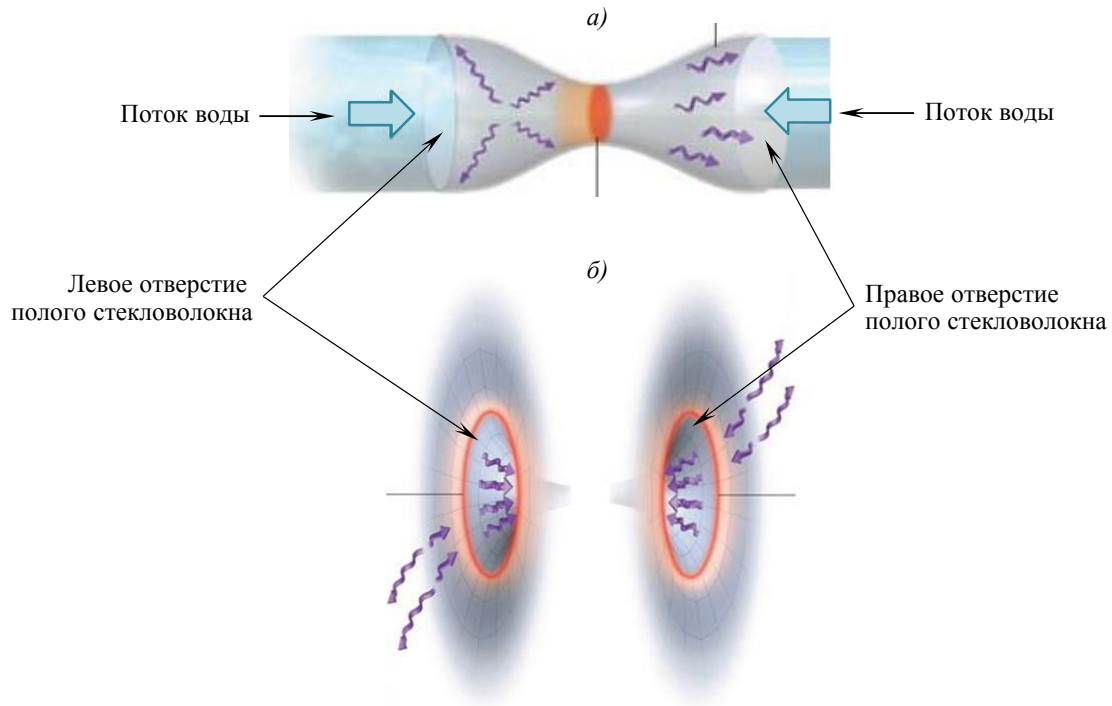


Рис. 10. Предположительная конфигурация внутренней поверхности полого стекловолокна вдоль канала в виде сопла Лавала (а) и процесс транспортировки воды через левое и правое отверстия (б) [26]

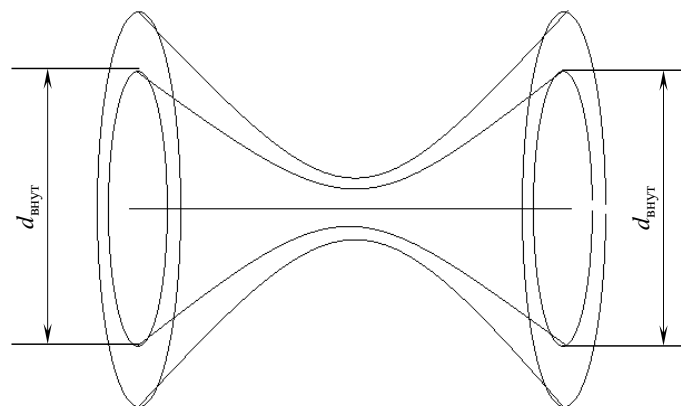


Рис. 11. Схематичное изображение предположительной конфигурации внутренней поверхности сквозного полого стекловолокна ($d_{\text{внут}}$ – входной диаметр внутренней окружности микроканала)

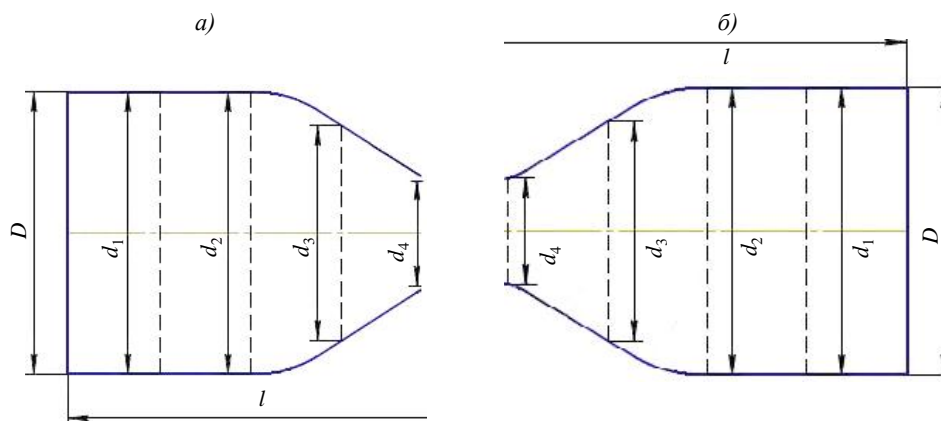


Рис. 12. Схема определения диаметров (d_1 – d_4) внутренней поверхности сквозного полого стекловолокна вдоль канала в левой (а) и правой (б) половинах [27] (D – входной диаметр левого и правого отверстий полого стекловолокна, l – длина стекловолокна)

При разработке математической модели для определения скорости потока воды в полых стекловолокнах рассматривали модель водопоглощения, применяемую в биологических и сельскохозяйственных науках [14, 15]. В данной модели исследовали водопроводящие микроканалы (диаметром <10 мкм) стволов хвойных деревьев и стеблей растений, которые идентичны полым стекловолокнам по диаметру. Исследования проведены до и после водопоглощения с помощью анатомического анализа, аналогичного микроструктурному анализу шлифов поперечного сечения стеклопластика на основе полых стекловолокон. Анатомический анализ проведен с помощью окулярного микрометра и ручного микротома (рис. 13) [14]. Определены значения радиального (внутренняя окружность) и тангенциального (наружная окружность) диаметров поперечного сечения водопроводящих микроканалов до водопоглощения. Площадь внутренней окружности заполнена воздухом (показана белым цветом на рис. 13). Площадь кольца определенной толщины, сформированного длинами внешней и внутренней окружностей, заполнена механической тканью (показана серым цветом на рис. 13).

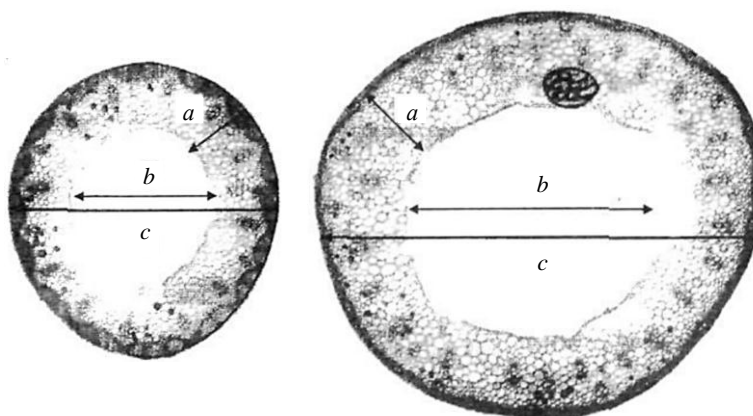


Рис. 13. Анатомический анализ поперечных срезов водопроводящих каналов растения тритикале: a – толщина стенки; b – диаметр внутренней окружности; c – диаметр наружной окружности [14]

Разница, которой можно пренебречь, заключается в том, что в деревьях и растениях вода поднимается на высоту h , характеризующую поле силы тяжести Земли $\rho_{ж}gh$,

а образец стеклопластика на основе полых стекловолокон погружается в воду на глубину h , характеризующую гидростатическое давление $\rho_{\text{ж}}gh$, где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения.

При медленном течении воды по тонким полым микроканалам сила сопротивления F_c определяется вязкостью воды. Если слои воды перемещаются с разными скоростями, то между ними возникает «трение» – сила вязкости [15]

$$F_c = \eta S \frac{v}{a},$$

где S – площадь каждого слоя воды; a – расстояние между слоями воды; η – коэффициент вязкости, характеризующий вязкие свойства жидкости (для воды $\eta \approx 10^{-3}$ кг/(м·с)); $\frac{v}{a}$ – градиент скорости, отражающий самое быстрое изменение при переходе от одного слоя воды к другому.

При движении воды по микроканалу ($d < 10$ мкм), аналогичном перемещению воды по трубе, градиент скорости v от стенок к центру по порядку величины равен $\frac{v}{d}$.

В случае равномерного течения воды по микроканалу сила вязкости F_v компенсируется перепадом давления Δp [15]:

$$F_v = \Delta p \frac{\pi d^2}{4}.$$

Для перепада давлений на длине l полого микроканала диаметром < 10 мкм получена оценка:

$$\Delta p \approx \frac{\eta lv}{d^2},$$

где v – объемная скорость потока воды в микроканале.

Более точная формула представляет собой закон Пуазейля [15], являющийся главным законом гидродинамики и связывающий объемную скорость потока воды в микроканале v с разностью гидродинамического давления воды в начале и конце микроканала Δp как движущей силы потока воды внутри микроканала, динамической вязкостью воды η , длиной l и диаметром d полого микроканала:

$$\Delta p = \frac{32\eta lv}{d^2}.$$

С учетом гидродинамического давления для подъема воды на участке ствола хвойного дерева в поле тяжести Земли на высоту h со скоростью v по водопроводящим микроканалам (микрососудам) диаметром d требуется перепад давления [15]

$$\Delta p = \rho_{\text{ж}}gh + \frac{32\eta lv}{d^2} = \rho_{\text{ж}}h\left(g + \frac{32\eta v}{d^2}\right),$$

где $\nu = \frac{\eta}{\rho_{\text{ж}}} \approx 10^{-6}$ м²/с – кинематическая вязкость воды.

Характерная скорость $v_{\text{сх}}$ потока воды, необходимая для обеспечения требуемого перепада давления Δp при перемещении воды внутри полости микроканалов диаметром

<10 мкм и длиной ≥ 20 мм, определяется из зависимости для гидродинамического давления [15]:

$$v_{\text{сх}} = \frac{gd^2}{32\nu}.$$

Данные зависимости параметров потока воды по водопрводящим микроканалам диаметром <10 мкм стволов хвойных деревьев можно адаптировать для исследования скорости потока воды в полых стекловолокнах, учитывая изменяемую конфигурацию их внутренней поверхности и используя вместо высоты h глубину погружения в воду образца стеклопластика.

Законы гидродинамики при течении воды по водопрводящим микроканалам стволов хвойных деревьев предположительно будут идентичны законам перемещения воды в полых стекловолокнах. Поэтому в процессе расчетных исследований скорости, гидродинамического давления и других параметров потока воды в полых стекловолокнах при задании граничных условий предположительно можно принять, что упругопрочностные характеристики механической ткани и стеклоткани идентичны в первом приближении.

Применение результатов анализа природоподобных технологий для исследования водопоглощения стеклопластика на основе полых стекловолокон

Для расчетного исследования и моделирования в области вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics) с прогнозированием мгновенных скоростей потока воды в микроканалах полого стекловолокна предположительно можно использовать программное обеспечение ANSYS Fluent.

Определить в режиме реального времени карты мгновенных измерений векторов скоростей или усредненных по времени полей скоростей в поперечном сечении микроскопического потока воды, перемещающегося за счет гидродинамического давления через микроканалы полых стекловолокон, предположительно можно с помощью микрофлюидных бесконтактных измерительных систем и устройств Micro PIV (Particle Image Velocimetry) или μ PIV, Stereo μ PIV (компания Dantec Dynamics). Данные измерительные системы и устройства имеют большие увеличения и разрешения для трех компонентов скорости, подходящие для изделий из оптически прозрачных материалов с полыми микроканалами (рис. 14) [28].

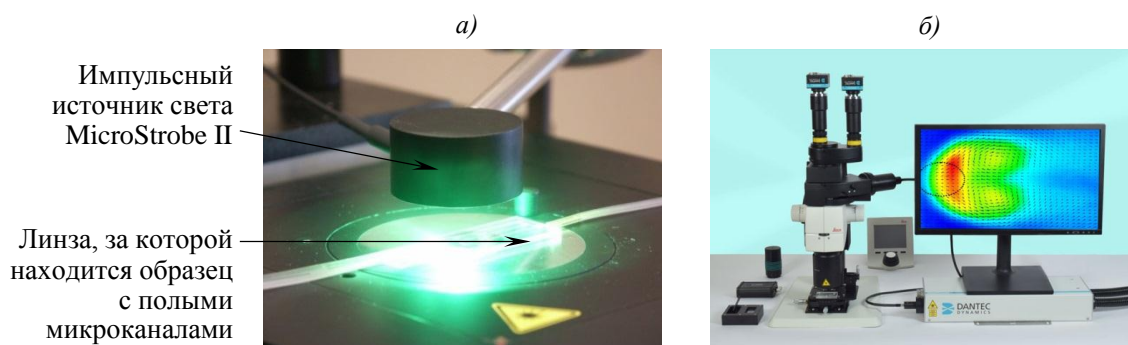


Рис. 14. Измерительная система и устройство Micro PIV, разработанные компанией Dantec Dynamics, для визуализации векторного поля мгновенных скоростей потока воды вдоль полого микроканала образца из оптически прозрачных неметаллических материалов: *а* – процесс подсветки образца с помощью импульсного источника света MicroStrobe II; *б* – процесс визуализации [28]

Микроскопический поток жидкости в образце с полыми микроканалами из оптически прозрачных неметаллических материалов освещается в целевой области универсальным устройством MicroStrobe II (рис. 14, а). Оно устанавливается на микроскопы и представляет собой импульсный источник света для микроскопической визуализации векторного поля мгновенных скоростей потоков жидкости (воды) в полых микроканалах (рис. 14, б).

Предварительно до импульсной подсветки образца в жидкость (воду) вводят индикаторные флуоресцентные светоотражающие нано- или микрочастицы (рис. 15), которые точно следуют за потоком в полости микроканалов образца [29]. В процессе импульсной подсветки образца по индикаторным отражающим частицам регистрируют перемещение потока вдоль микроканала в результате отражения от частиц и рассеивания светового сигнала в направлении камеры. Объектив камеры проецирует изображение целевой области образца на матрицу цифровой камеры. Камера способна фиксировать каждый световой импульс в отдельных кадрах.

Векторы мгновенных скоростей \vec{v} потока воды определяются на участках целевой области полых микроканалов образца путем измерения смещения $\Delta\vec{x}$ индикаторных светоотражающих частиц между двумя световыми импульсами I_1 и I_2 с учетом известного значения времени задержки Δt для двух последовательных изображений:

$$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t}.$$

После записи последовательности из двух световых импульсов изображения делятся на небольшие участки, называемые зонами опроса (IA). Зоны опроса каждого кадра изображения первого (I_1) и второго (I_2) световых импульсов перекрестно коррелируют друг с другом пиксель за пикселем.

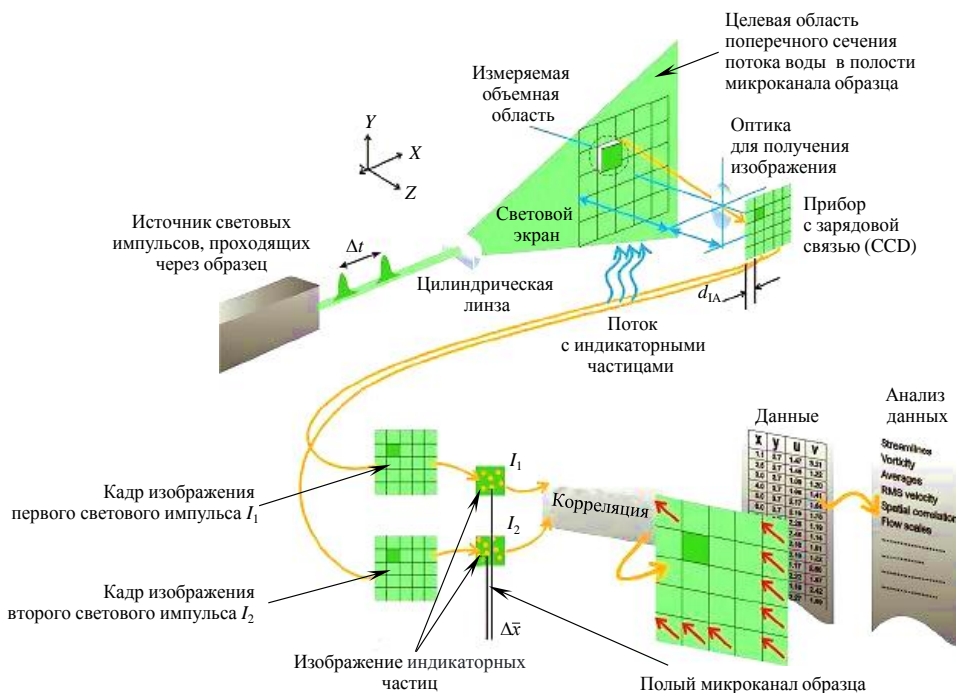


Рис. 15. Схема измерения с помощью устройства Micro PIV векторного поля мгновенных скоростей или усредненных по времени полей скоростей в поперечном сечении потока воды вдоль полого микроканала образца [29]: Δt – время задержки; d_{IA} – диаметр зоны опроса; $\Delta\vec{x}$ – параметр смещения

Корреляция создает пик сигнала, определяющий общее смещение частиц в потоке воды $\Delta\bar{x}$. Точное измерение смещения $\Delta\bar{x}$, а следовательно, и скорости \bar{v} достигается с помощью субпиксельной интерполяции. Карту векторов мгновенных скоростей потока воды в полых микроканалах образца для всей целевой области получают путем повторения кросс-корреляции для каждой области сканирования по двум кадрам изображения световых импульсов, снятым камерой (рис. 16) [29].

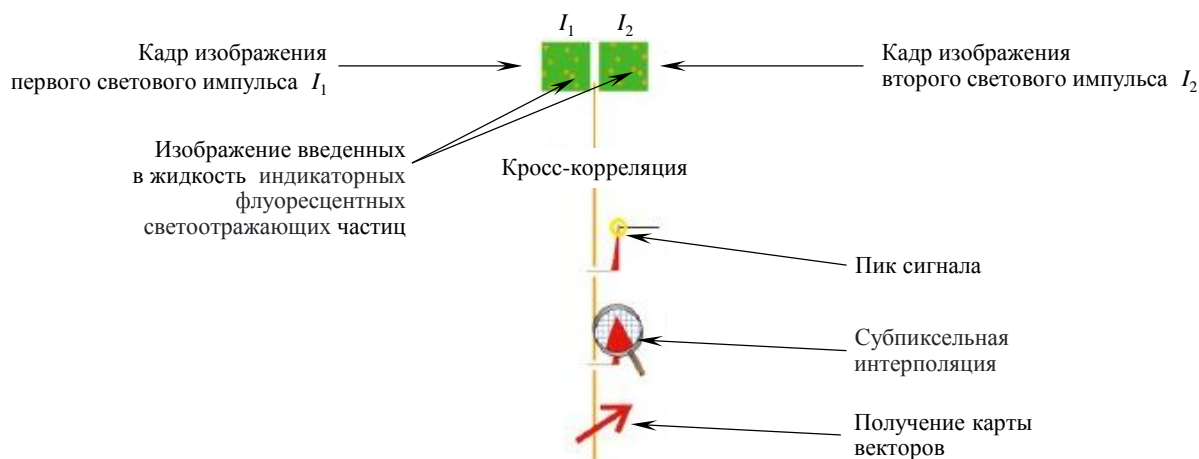


Рис. 16. Кросс-корреляция для каждой области сканирования по двум кадрам изображения световых импульсов для получения карты векторов мгновенных скоростей потока воды в полых микроканалах образца [29]

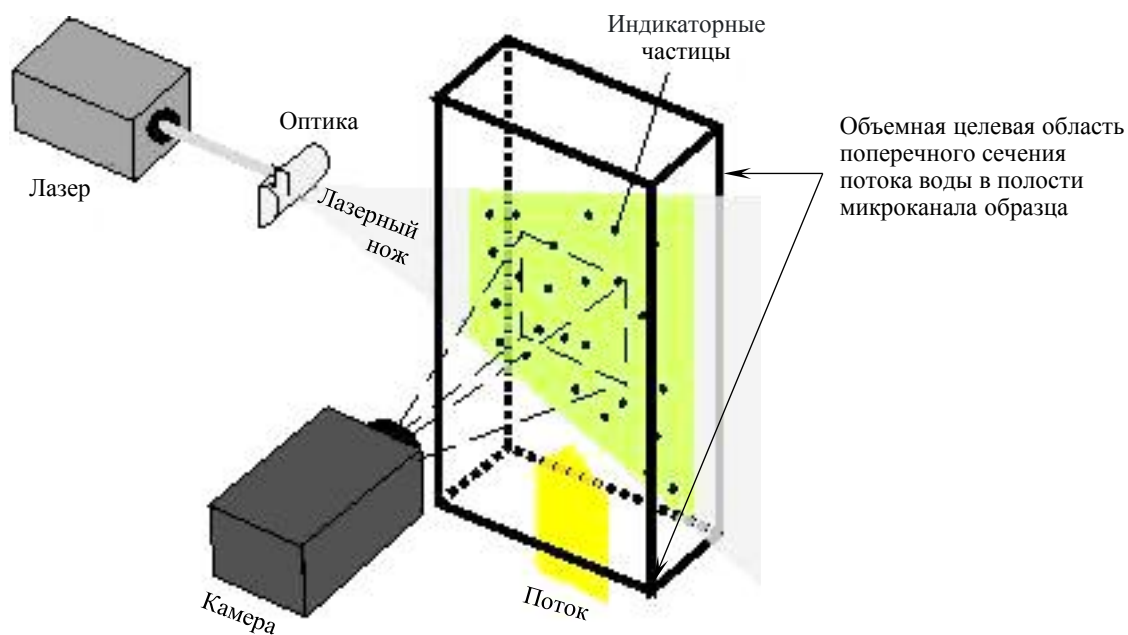


Рис. 17. Общая схема измерения мгновенного поля скорости потока воды в полном микроканале образца [30]

Общая схема измерения мгновенного поля скорости потока воды между заданными поперечными сечениями полого микроканала образца, ограничивающими объемную целевую область, представлена на рис. 17 [30]. В данной схеме определение скорости

потока в микроканале основано на измерении перемещения отражающих индикаторных частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени.

Заключения

Результаты микроструктурных исследований образцов стеклопластика на основе расплавленного эпоксидного связующего и ткани из стеклянных крученых комплексных нитей на основе полых волокон показали, что диаметр внутренней полости стеклянных волокон варьирует от 2,1 до 5,5 мкм.

Анализ зависимостей изменения значений плотности стеклопластика, измеренной методом гидростатического взвешивания, от продолжительности выдержки в воде показал, что полученные кривые близки к логарифмическому тренду при попытке функции плотности достичь плато.

Результаты анализа природоподобных технологий – аналогичных систем и моделей для водопроводящих микроканалов диаметром <10 мкм в области других наук (подземная гидромеханика, биологические, сельскохозяйственные) – позволили исследовать процесс водопоглощения стеклопластика с полыми стекловолокнами. Результаты исследования процесса водопоглощения стеклопластика позволяют предположить, что внутренняя поверхность полого стекловолокна имеет изменяемую конфигурацию в виде усеченных конусов вдоль длины микроканала и обеспечивает двухстороннее водопоглощение за счет создания гидродинамического перепада давления и дальнейшего эжектирования потока воды внутрь полости микроканала.

Данное исследование процесса водопоглощения на базе анализа природоподобных технологий представляет большой практический интерес при определении методом гидростатического взвешивания плотности стеклопластиков на основе полых стекловолокон конструкционного и радиотехнического назначения с целью оценки весовой эффективности и удельных прочностных характеристик.

В дальнейшем необходимо исследовать:

– структуру полых стекловолокон вдоль длины их микроканалов методом компьютерной томографии с определенным разрешением с целью определения диаметров поперечного сечения и геометрии внутренней поверхности;

– поток воды в полых стекловолокнах методами вычислительной гидродинамики с помощью программного обеспечения ANSYS Fluent с целью прогнозирования его мгновенных скоростей в поперечном сечении;

– поток воды в полых стекловолокнах с помощью устройства Micro PIV в режиме реального времени с целью определения его мгновенных скоростей в поперечном сечении.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П., Пономаренко С.А., Ахмадиева К.Р., Павлюк Б.Ф. Влияние тканых волокнистых наполнителей различных типов на свойства отвержденного связующего ВС-2526К // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-28-36.
2. Францев М.Э., Кирейнов А.В. Результаты сравнительных испытаний композиционных материалов судостроительного назначения на основе стеклянных и базальтовых волокон на полиэфирном связующем на водопоглощение // Транспортные системы. 2019. № 1 (11). С. 41–48. DOI: 10.46960/62045_2019_1_41.

3. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 1. С. 18–26.
4. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.; Л.: Гостоптехиздат, 1949. 58 с.
5. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 40 с.
6. Proctor P. Stitched composite wings eyed for future transports // *Aviation Week & Space Technology*. 1998. No. 8. P. 49–50.
7. Виноградов В.М., Гончаренко В.А., Комаров Г.В. Моделирование в технологии полимерных деталей и изделий // *Пластические массы*. 2005. № 1. С. 36–39.
8. Пономарева И.Н., Мордвинов В.А. Подземная гидромеханика: учеб. пособие. Пермь: Пермск. гос. техн. ун-т, 2009. 137 с.
9. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Розенберг Г.Д. Нефтегазовая гидромеханика: учеб. пособие для вузов. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2003. 479 с.
10. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Каневская Р.Д., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. 2-е изд., испр. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2006. 488 с.
11. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов: учеб. пособие для вузов. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2003. 128 с.
12. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика: учеб. пособие для вузов. М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 736 с.
13. Евдокимова В.А., Кочина И.Н. Сборник задач по подземной гидравлике: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., стер. перепеч. с изд. 1979. М.: Альянс, 2007. 169 с.
14. Комарова Е.А. Особенности анатомического строения стебля и колосового стержня сортов тритикале в связи с продуктивностью колоса и устойчивостью к полеганию: автореф. дис. ... канд. биолог. наук. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2007. 22 с.
15. Минеев А.П. О высоких деревьях. М.: Квант, 1992. С. 10–15.
16. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 2. С. 38–42.
17. Deleglise M. Modeling of high speed RTM injection with highly reactive resin with on-line mixing // *Applied Science and Manufacturing*. 2011. Vol. 42 (10). P. 1390–1397.
18. Graf M., Fries E., Renkl J. et al. High-Pressure Resin Transfer Molding – Process Advancements // 10-th Annual automotive composites conferences and exhibition ACCE. Los Angeles, 2010. P. 15–16.
19. Mouton S., Teissandier D., Sebastian P., Nadeau J.P. Manufacturing requirements in design: The RTM process in aeronautics // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. Vol. 41. No. 1. P. 125–130.
20. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
21. Гусева М.А., Синяков С.Д., Долгова Е.В., Пономаренко С.А. Исследование влияния свойств фенолформальдегидной смолы и режима отверждения на характеристики связующего ФН // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-63-73.
22. Малышева Г.В., Мараховский П.С., Баринев Д.Я., Николаев Е.В. Оптимизация режимов отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.

23. Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Цыкун Р.Г., Донецкий К.И. Конструкционная многослойная тканая преформа для изготовления фрагмента интегральной панели летательного аппарата // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-114-124.
24. Пузырецкий Е.А., Донецкий К.И., Шабалин Л.П., Караваев Р.Ю., Савинов Д.В. Теоретико-экспериментальное исследование вакуумного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей (ленты и ткани) и расплавленного эпоксидного связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-109-121.
25. Григорьев В.А., Калабухов Д.С., Захарченко В.С. и др. Основы теории, расчета и проектирования воздушно-реактивных двигателей: учеб. для вузов. Самара: Изд-во Самарск. ун-та, 2021. 67 с.
26. Эхо черных дыр // Modcos. URL: <https://www.modcos.com/articles.php?id=138> (дата обращения: 17.04.2025).
27. Гидрогазодинамика. Расчет сопла Лаваля // Reshebnik. URL: <https://reshebnik.su/node/11234> (дата обращения: 17.04.2025).
28. Microstrobe II – Dantec Dynamics. Precision Measurement Systems & Sensors // Dantecdynamics. URL: <https://www.dantecdynamics.com/components/microstrobe-ii/?sourceid=13683> (дата обращения: 17.04.2025).
29. Measurement Principles of PIV // Dantecdynamics. URL: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/fluid-mechanics/particle-image-velocimetry-piv/measurement-principles-of-piv/> (дата обращения: 17.04.2025).
30. Принцип PIV-метода // Laser-portal. URL: https://www.laser-portal.ru/content_185 (дата обращения: 17.04.2025).

References

1. Muhametov R.R., Petrova A.P., Ponomarenko S.A., Ahmadiyeva K.R., Pavlyuk B.F. Influence of woven fibrous fillers of various types on properties of cured binder VS-2526K. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (63), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 14, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-28-36.
2. Frantsev M.E., Kireynov A.V. Results of comparative tests of composite materials for shipbuilding purposes based on glass and basalt fibers on a polyester binder for water absorption. *Transportnye sistemy*, 2019, no. 1 (11), pp. 41–48. DOI: 10.46960/62045_2019_1_41.
3. Dushin M.I., Hrulkov A.V., Muhametov R.R., Chursova L.V. Features of manufacturing of products from PCM impregnation method under pressure. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 1, pp. 18–26.
4. Masket M. *Flow of homogeneous liquids in a porous medium*. Moscow; Leningrad: Gostoptekhizdat, 1949, 58 p.
5. Leibenzon L.S. *Movement of natural liquids and gases in a porous medium*. Moscow; Leningrad: Gostoptekhizdat, 1947, 40 p.
6. Proctor P. Stitched composite wings eyed for future transports. *Aviation Week & Space Technology*, 1998, no. 8, pp. 49–50.
7. Vinogradov V.M., Goncharenko V.A., Komarov G.V. Modeling in the technology of polymer parts and products. *Plasticheskie massy*, 2005, no. 1, pp. 36–39.
8. Ponomareva I.N., Mordvinov V.A. *Underground hydromechanics: textbook*. Perm: Perm State Technical Univ., 2009, 137 p.
9. Basniev K.S., Dmitriev N.M., Rozenberg G.D. *Oil and gas hydromechanics: textbook for universities*. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Research, 2003, 479 p.
10. Basniev K.S., Dmitriev N.M., Kanevskaya R.D., Maksimov V.M. *Underground hydromechanics*. 2nd ed., cor. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Research, 2006, 488 p.

11. Kanevskaya R.D. *Mathematical Modeling of Hydrodynamic Processes of Hydrocarbon Deposit Development*: textbook for univ. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Research, 2003, 128 p.
12. Shchelkachev V.N., Lapuk B.B. *Underground Hydraulics*: textbook for univ. Moscow; Izhevsk: Regular and Chaotic Dynamics, 2001, 736 p.
13. Evdokimova V.A., Kochina I.N. *Collection of Problems in Underground Hydraulics*: textbook for univ. 2nd ed., reprinted from the original ed. 1979. Moscow: Alliance, 2007, 169 p.
14. Komarova E.A. *Features of the anatomical structure of the stem and spike rachis of triticale varieties in connection with spike productivity and lodging resistance*: thesis abstract, Cand. Sc. (Bio.). Moscow: Rus. State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2007, 22 p.
15. Mineev A.P. *On tall trees*. Moscow: Quantum, 1992, pp. 10–15.
16. Muhametov R.R., Ahmadieva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. New polymeric binding for perspective methods of manufacturing of constructional fibrous PCM. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2011, no. 2, pp. 38–42.
17. Deleglise M. Modeling of high speed RTM injection with highly reactive resin with on-line mixing. *Applied Science and Manufacturing*, 2011, vol. 42 (10), pp. 1390–1397.
18. Graf M., Fries E., Renkl J. et al. High-Pressure Resin Transfer Molding – Process Advancements. *10-th Annual automotive composites conferences and exhibition ACCE*. Los Angeles, 2010, pp. 15–16.
19. Mouton S., Teissandier D., Sebastian P., Nadeau J.P. Manufacturing requirements in design: The RTM process in aeronautics. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, vol. 41, no. 1, pp. 125–130.
20. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Reports XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS, 2016, pp. 25–26.
21. Guseva M.A., Sinyakov S.D., Dolgova E.V., Ponomarenko S.A. Study of the effect of the properties of phenol-formaldehyde resin and the curing mode on the characteristics of the FN binder. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-63-73.
22. Malysheva G.V., Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Nikolaev E.V. Optimization of the curing modes of fiber-glass based on epoxy binder. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
23. Belinis P.G., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Tsykun R.G., Donetskii K.I. Design research on a structural multilayer woven preform of an integral panel fragment for aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-114-124.
24. Puzyretskiy E.A., Donetskii K.I., Shabalin L.P., Karavaev R.Yu., Savinov D.V. Theoretical and experimental study of the vacuum forming of semipregs based on carbon fillers (tapes and fabric) and melting epoxy binding. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-109-121.
25. Grigoriev V.A., Kalabukhov D.S., Zakharchenko V.S. et al. *Fundamentals of the theory, calculation and design of air-breathing engines: textbook for universities*. Samara: Publ. house of Samara Univ., 2021, 67 p.
26. Echo of black holes. *Modcos*. Available at: <https://www.modcos.com/articles.php?id=138> (accessed: April 17, 2025).
27. Hydrogasdynamics. Calculation of the Laval nozzle. *Reshebnik*. Available at: <https://reshebnik.su/node/11234> (accessed: April 17, 2025).

28. Microstrobe II – Dantec Dynamics. Precision Measurement Systems & Sensors. *Dantecdynamics*. Available at: <https://www.dantecdynamics.com/components/microstrobe-ii/?sourceid=13683> (accessed: April 17, 2025).
29. Measurement Principles of PIV. *Dantecdynamics*. Available at: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/fluid-mechanics/particle-image-velocimetry-piv/measurement-principles-of-piv/> (accessed: April 17, 2025).
30. The principle of the PIV method. *Laser-portal*. Available at: https://www.laser-portal.ru/content_185 (accessed: April 17, 2025).

Информация об авторах

Копылов Алексей Васильевич, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Прокопенков Василий Григорьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Курносков Артем Олегович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Aleksey V. Kopylov, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vasily G. Prokopenkov, Engineer, 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

Artem O. Kurnosov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.05.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.06.2025.
The article was submitted 22.05.2025; approved and accepted for publication after reviewing 03.06.2025.