

## Моделирование системы подачи связующего вещества в процессе вакуумной инфузии композитной панели

*Описаны подходы к оптимизации технологического процесса изготовления крупногабаритных изделий типа панель из полимерных композиционных материалов по технологии вакуумной инфузии. Представлены результаты моделирования пропитки крупногабаритного изделия типа панель при различной конфигурации системы подачи и отвода связующего вещества. Предложена стратегия пропитки, обеспечивающая уменьшение неравномерности скорости движения фронта пропитки на участках преформы с целью минимизации пористости.*

**А.П. КОВАЛЬ,**  
аспирант,  
**И.О. БОБАРИКА,**  
канд. техн. наук  
(ИрНИТУ, Иркутск)  
kovalap@ex.istu.edu

**Конечно-элементное моделирование, композиционные материалы, вакуумная инфузия, крупногабаритные изделия, оптимизация технологического процесса, стратегия инфузирования, панель фюзеляжа**

В настоящее время наблюдается увеличение доли композитных конструкций в изделиях транспорта [1–4]. Из-за высоких требований к изделиям возникает необходимость оптимизации технологического процесса изготовления [5–9], повышения его стабильности и автоматизации поддержания технологических параметров.

Рассмотрены две конфигурации системы подачи связующего вещества для пропитки панели секции фюзеляжа, имеющей радиус  $R = 2$  м и сектор  $180^\circ$ . Так как панель симметрична, рассмотрена одна половина. В первом случае половина панели поделена на 9 участков длиной 0,35 м. Во втором случае длины 11 участков были рассчитаны способом [10]. Приведем полученные длины участков: участок № 1 – 0,326 м; участок № 2 – 0,318 м; участок № 3 – 0,310 м; участок № 4 – 0,302 м; участок № 5 – 0,294 м; участок № 6 – 0,286 м; участок № 7 – 0,278 м; участок № 8 – 0,270 м; участок № 9 – 0,262 м; участок № 10 – 0,254 м; участок № 11 – 0,246 м. Итого – 3,141 м.

В начале каждого участка установлена линия подачи связующего вещества. Линия отвода связующего находится на верхней границе преформы. Линии системы подачи и отвода связующего вещества на поверхности панели секции фюзеляжа, имеющей радиус  $R = 2$  м, показаны на рис. 1.

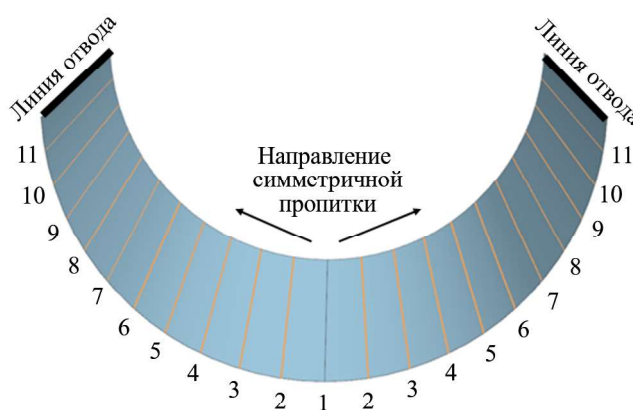


Рис. 1

Таким образом, для пропитки панели секции фюзеляжа, имеющей радиус  $R = 2$  м и сектор  $180^\circ$ , необходима 21 линия подачи и 2 линии отвода связующего вещества. Линии отвода расположены на верхних краях панели. Особенностью данного подхода является то, что в данном случае длина панели может варьироваться, что не повлияет на количество и шаг линий подачи.

Для моделирования пропитки панели в программном продукте PAM-RTM был рассмотрен ее фрагмент шириной 0,1 м. Для проведения расчета создана тетрагональная конечно-элементная сетка. На рис. 2 изображен участок преформы с построенной сеткой.

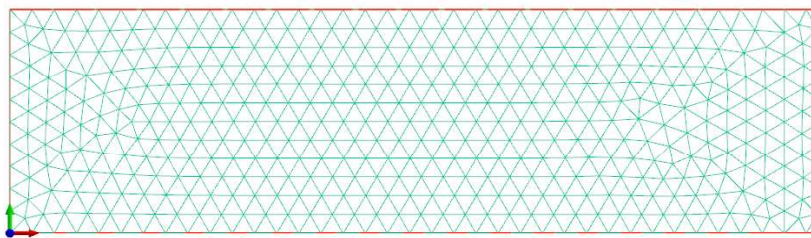


Рис. 2

Преформа состоит из 12 слоев UMT49S12K-EP и двух технологических слоев – разделительной (жертвенной) ткани Airtech Release Ply Super F и проводящей сетки Airtech Knitflow105 HT. Технологические слои расположены сверху, нижняя граница преформы лежит на формообразующей поверхности оснастки. Структура слоев изображена на рис. 3.

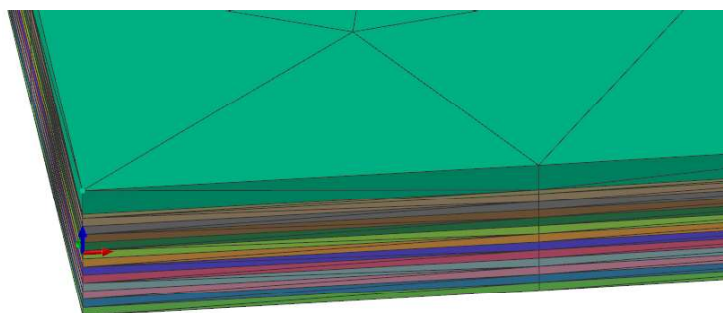


Рис. 3

В процессе пропитки происходит последовательное подключение следующей линии подачи и отключение предыдущей, что достигается с помощью установленных сенсоров. Фрагмент панели с восемью установленными сенсорами показан на рис. 4, а.

Условие срабатывания – полное заполнение связующим веществом ближайших соседних элементов. Положение сенсора относительно линии подачи показано на рис. 4, б. Расстояние от линии подачи до сенсора в плане составляет 20 мм.

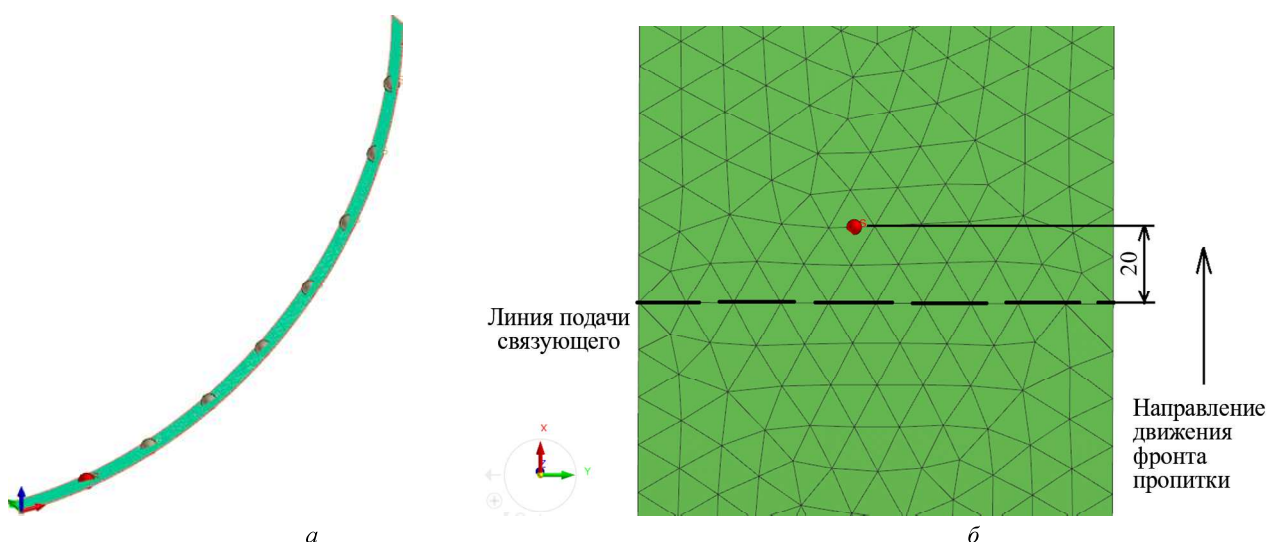


Рис. 4

Особенность установки – расположение линии подачи на верхнем слое (распределяющей сетке), сенсора – на нижнем слое, лежащем на поверхности оснастки. Такое расположение позволяет фронту пропитки пройти место установки следующей линии на момент срабатывания сенсора и активации ли-

нии подачи связующего вещества, таким образом, исключается захват воздуха в процессе смены линии подачи связующего.

Давление в линии подачи и отвода связующего вещества составляет 101325 и 1000 Па. Процесс подготовки модели для обеих конфигураций идентичен и отличается только количеством и размером участков, на которые поделена преформа.

Далее было проведено моделирование пропитки, проход фронта пропитки осуществлен через весь фрагмент снизу вверх, поочередно активировались новые линии подачи и перекрывались предыдущие. В результате расчета был получен график заполнения преформы, представленный на рис. 5. Здесь: 1 – график пропитки в базовой конфигурации (9 линий подачи связующего вещества); 2 – график пропитки в оптимизированной конфигурации (11 линий подачи связующего вещества).

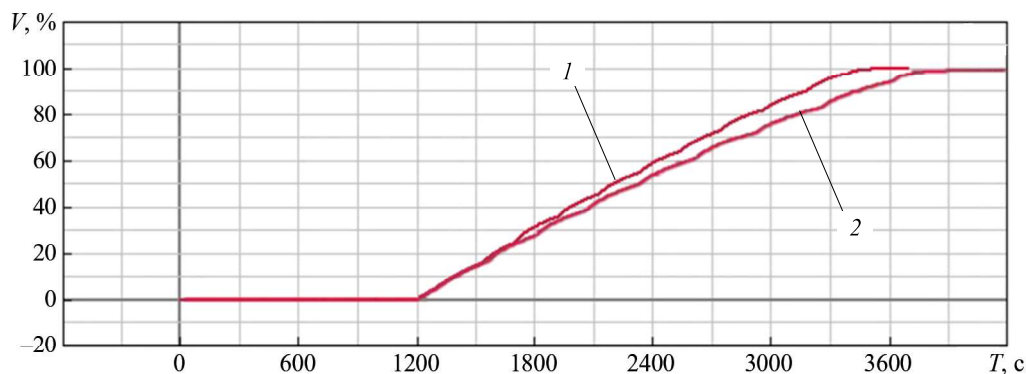


Рис. 5

Рис. 5 демонстрирует время задержки запуска первой линии, имитирующей время, затраченное на дегазацию связующего и приобретение им соответствующей вязкости. Также наблюдаются дугообразные участки, совпадающие с моментами открытия достигнутых линий подачи и закрытие пройденных.

В процессе пропитки изделия должно соблюдаться следующее условие:

$$T_{\text{гель}} > T_{\text{дегаз}} + T_{\text{проп}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{гель}}$ ,  $T_{\text{дегаз}}$ ,  $T_{\text{проп}}$  – время гелеобразования, дегазации и пропитки.

Для связующего T20-60 время гелеобразования составляет 7200 с, время дегазации – 1200 с. Таким образом, оставшееся время на пропитку – 6000 с.

Время пропитки при базовой конфигурации составляет 3063 с, при оптимизированной – 2492 с, что на 19 % быстрее. При соблюдении условия (1) для процесса пропитки существует запас по времени, выражаемый в виде коэффициента безопасности, рассчитываемого по формуле

$$K = \frac{T_{\text{гель}} - T_{\text{дегаз}}}{T_{\text{проп}}}. \quad (2)$$

Таким образом, запас по времени для базовой конфигурации составляет 1,96, для оптимизированной конфигурации – 2,4, что позволяет оставить больший запас времени на постинфузионное выравнивание и реагирование на внештатные ситуации.

Полученное в результате расчета поле скоростей фронта пропитки позволило оценить изменение скорости на различных участках преформы (рис. 6).

На участках модели базовой конфигурации (рис. 6, а) наблюдаются области, в которых скорость фронта пропитки ниже 0,0007 м/с, что увеличивает общее время технологического процесса и повышает вероятность образования макропористости [11, 12]. Также оптимизированная конфигурация (рис. 6, б) имеет более равномерное поле скоростей фронта пропитки.

Более подробно поле скоростей фронта пропитки на крайних участках рассмотрено на рис. 7: а – базовая конфигурация; б – оптимизированная конфигурация.

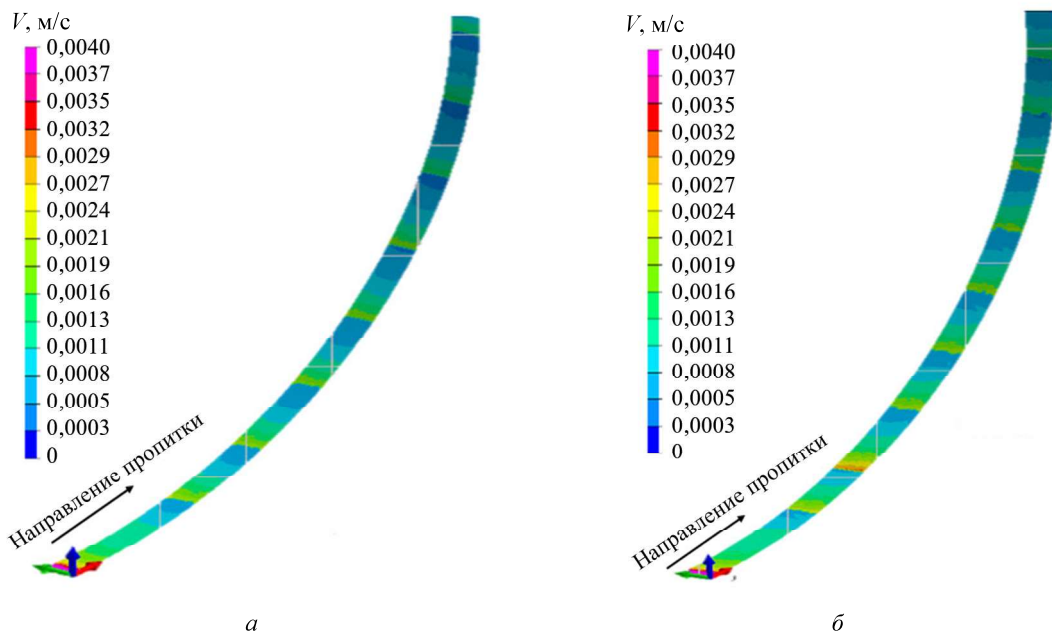
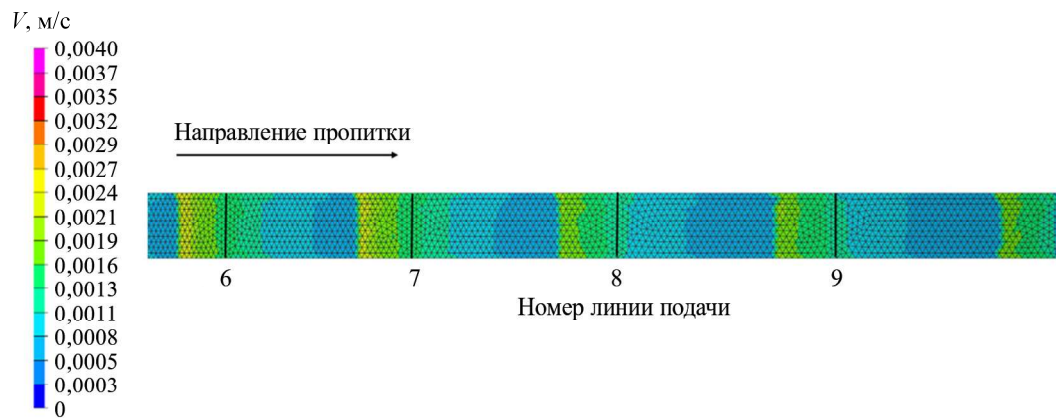
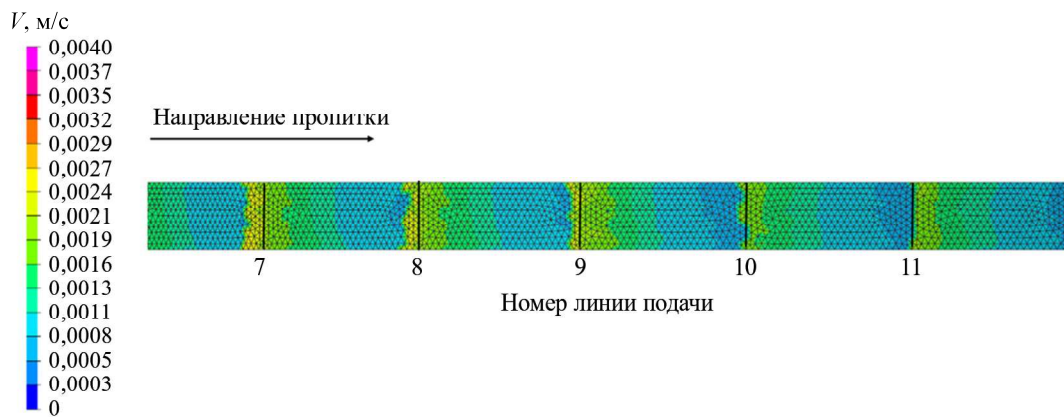


Рис. 6



а

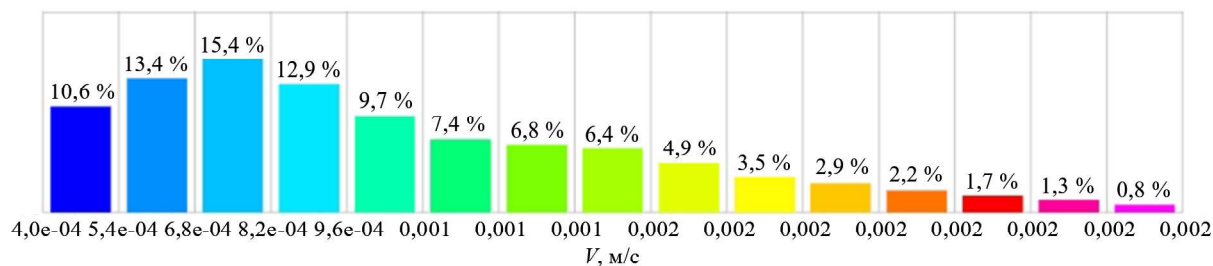


б

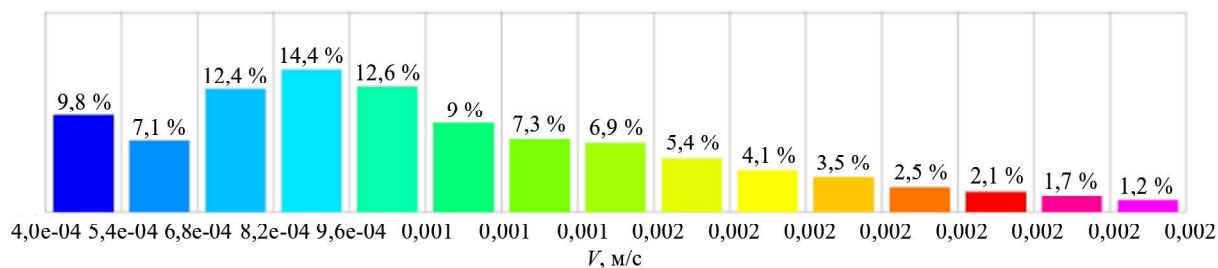
Рис. 7

Гистограммы скоростей фронта пропитки приведены на рис. 8: *а* – базовая конфигурация; *б* – оптимизированная конфигурация.

Рис. 8 демонстрирует рост средней скорости пропитки и уменьшение доли пропитки с пониженной на 2–7 % скоростью.



a



b

Рис. 8

Применение рассматриваемого подхода к оптимизации размещения линий подачи связующего вещества позволяет учитывать изменение вязкости и ориентации пропитываемого участка в пространстве с учетом набора высоты фронтом пропитки и устанавливать линии подачи с переменным расстоянием относительно друг друга.

Благодаря полученной конфигурации системы подачи и отвода связующего вещества на поверхности панели уменьшена неравномерность скорости фронта, повышена минимальная скорость за счет сокращения длины пути пропитки и уменьшено общее время процесса, тем самым увеличена производительность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (обзор) // Тр. ВИАМ. 2022. № 11 (117). С. 81–92.
2. Голубничий Е.Н. Потенциал рынка композитных материалов в Российской Федерации // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. 2021. № 4. С. 260–264.
3. Нирусин Р.В., Золкин А.Л., Семенов Е.Д. Перспективы развития полимерных и композиционных материалов в самолетостроении // Техника и технология современных производств: Сб. ст. 2-й Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Пенза, 12–13 апр. 2021. Пенза: ПГУ, 2021. С. 161–165.
4. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии [Электронный журнал]. 2017. № S. URL: [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2017/2017\\_S\\_25\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2017/2017_S_25_1.pdf) (дата обращения: 19.05.2024).
5. Хуанг Д.П. и др. Технология вакуумной инфузии в производстве композитных конструкций: проблемы и перспективы // Подготовка инженерных кадров в условиях цифровой трансформации: Сб. науч. тр., посвященный 80-летию РВПК ПАО «Роствертол» им. Б.Н. Слюсаря. Ростов н/Д: ДГТУ, 2019. С. 104–127.
6. Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1 // Тр. ВИАМ. 2022. № 6 (112). С. 58–67.
7. Хрульков А.В. и др. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 2 // Тр. ВИАМ. 2022. № 7 (113). С. 50–62.
8. Тимошков П.Н. и др. Композиционные материалы для безавтоклавной технологии (обзор) // Тр. ВИАМ. 2018. № 3 (63). С. 37–48.
9. Халиулин В.И., Батраков В.В. Технология производства изделий из композитов: технология интегральных конструкций. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2018. 192 с.

10. Коваль А.П., Бобарика И.О. Элементы алгоритма оптимизации технологического процесса вакуумной инфузии при изготовлении крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 192–196.
11. Душин М.И. и др. Некоторые особенности жидкостного формования полимерных композиционных материалов (обзор) // Тр. ВИАМ. 2017. № 2 (50). С. 54–64.
12. Пузырецкий Е.А. и др. Моделирование и оптимизация процессов создания композитного тела гибридной лопасти тягового винта // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 3. С. 141–147.

Поступила в редакцию 19.06.24

После доработки 26.08.24

Принята к публикации 30.08.24

## Modeling of Resin Feeding System in Vacuum Infusion Process of Composite Panel

A.P. KOVAL' AND I.O. BOBARIKA

ISTU, Irkutsk

*Approaches to optimizing the technological process of manufacturing large-sized products such as panels made of polymer composite materials using vacuum infusion technology are described. The results of modeling the impregnation of a large-sized panel-type product with different configurations of the resin supply and discharge system are presented. An impregnation strategy is proposed to reduce the uneven velocity of the impregnation front in the preform sections in order to minimize porosity.*

**Finite element modeling, composite materials, VaRTM, large-sized products, technological process optimization, infusion strategy, fuselage panel**