

10. *Watson G.S.* Goodness-of-fit tests on a circle. II, *Bio-metrika*, 1962, Vol. 49, No. 1-2, pp. 57-63.
11. *Fedosov V.P.* *Prikladnye matematicheskie metody v statisticheskoy radiotekhnike: ucheb. posobie* [Applied mathematical methods in statistical radio engineering: a textbook]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 74 p.
12. *Ryzhov V.P., Fedosov V.P.* *Optimal'nye metody obrabotki signalov na fone pomekh: Tekst lektsiy* [Optimal methods of signal processing against the background of interference: The text of lectures]. Taganrog: TRTI, 1990, 54 p.
13. *Fedosov V.P.* *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: dlya samostoyatel'nogo izucheniya: ucheb. posobie* [Radio engineering circuits and signals: for self-study: a textbook]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004, 208 p.
14. *Ryzhov V.P., Fedosov V.P.* *Analiz radiotekhnicheskikh ustroystv pri vozdeystvii sluchaynykh protsessov* [Analysis of radio engineering devices under the influence of random processes]. Taganrog: TRTI, 1986.
15. *Ryzhov V.P., Fedosov V.P.* *Statisticheskie metody obrabotki signalov* [Statistical methods of signal processing]. Taganrog: TRTI, 1986.
16. *Repin V.G., Tartakovskiy G.P.* *Statisticheskiy sintez pri apriornoy neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh system* [Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems]. Moscow: Sovetskoe radio, 1977, 432 p.
17. *Bogdanovich V.A., Vostretsov A.G.* *Teoriya ustoychivogo obnaruzheniya, razlicheniya i otsenivaniya signalov* [The theory of stable detection, discrimination and evaluation of signals]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 320 p.
18. *Gaek Ya., Shidak Z.* *Teoriya rangovykh kriteriev* [The theory of rank criteria]: translated from English. Moscow: Nauka, 1971.
19. *Rabiner L., Gould R.* *Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov* [Theory and application of digital signal processing]. Moscow: Mir, 1978.
20. *Sergienko A.B.* *TSifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Saint Petersburg: Izd-vo «Piter», 2002, 608 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.А. Марьев.

**Приходченко Алексей Иванович** – Южный федеральный университет; e-mail: zzalxeizz@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Prikhodchenko Alexey Ivanovich** – Southern Federal University; e-mail: zzalxeizz@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the Department of Fundamentals of Radio Engineering; postgraduate.

УДК 62-5:519.6

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-172-185

**Хуанг Чун-Пинь**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

*Представлена технология компьютерного моделирования процесса вакуумной инфузии в производстве крупногабаритных полимеркомпозитных конструкций, привлекающего все большее внимание при производстве летательных аппаратов, благодаря простоте реализации и относительно низкой стоимости подготовки производства. Трудность промышленной реализации процесса и обеспечения требуемого качества обусловлена его высокой чувствительностью к режимам - температуре, вакуумному давлению и схеме расположения портов вакуума и инъекции связующего. Цель разработанной методики компьютерного моделирования процесса с возможностью его последующей оптимизации состоит в исключении используемого в настоящее время длительного и весьма дорогостоящего метода проб и ошибок при отработке технологии. Предлагаемая математическая модель*

*процесса, связывающая уравнение фазового поля, реконструирующего границу раздела связующего и вакуумированной области преформы, уравнения Ричардса движения вязкой жидкости в ненасыщенной пористой среде, термокинетики связующего и теплопроводности реализована в среде конечноэлементного пакета. Компьютерная реализация модели обеспечивают точную реконструкцию динамики фронта распространения связующего в пористой преформе, возможность возникновения и локализацию непропитанных зон формуемой конструкции, тем самым, позволяя исключить образование неисправимого брака. Полученные результаты демонстрируют способность разработанной техники обеспечить стабильность качества производимых композитных конструкций с повышенными требованиями к сплошности структуры и конструктивной прочности.*

*Полимерные композиты; Технология композитов; Вакуумная инфузия; Моделирование и оптимизация процессов.*

**Jyun-Ping Huang**

### **MODELING OF THE VACUUM INFUSION PROCESSES IN THE MANUFACTURING OF THE LARGE POLYMERIC COMPOSITE STRUCTURES**

*The article presents the technology of computer simulation of the vacuum infusion process in the production of large-sized polymeric composite structures, which is attracting more and more attention in the aircraft industry, due to the ease of implementation and the relatively low cost of production preparation. The difficulty of industrial implementation of the process and ensuring the required quality is due to its high sensitivity to modes - temperature, vacuum pressure and the layout of the vacuum ports and resin injection. The purpose of the developed methodology for computer modeling of the process with the possibility of its subsequent optimization is to exclude the currently used lengthy and very expensive trial and error method when working out the technology. The proposed mathematical model of the process linking the equation of the phase field, which reconstructs the interface between the resin and the void region of the preform, the Richards equation for the propagating viscous fluid in an unsaturated porous medium, the thermal kinetics of the resin and thermal conductivity, is implemented in the environment of a finite element package. Computer implementation of the model provides an accurate reconstruction of the dynamics of the front of the propagating resin in a porous preform, the possibility of the emergence and localization of non-impregnated zones of the molded structure, thereby eliminating the formation of irreparable defects. The results obtained demonstrate the ability of the developed technique to ensure the stability of the quality of the produced composite structures with increased requirements for the continuity of its microstructure and its structural strength.*

*Polymeric composites; Composite technology; Vacuum infusion; Process modeling and optimization.*

**1. Введение.** Технологии производства полимерных композитов на основе вакуумной инфузии привлекают все большее внимание инженеров и ученых благодаря простоте ее реализации, невысокой стоимости и трудоемкости подготовки производства. Однако промышленное использование этих технологий требует большого количества предварительных пробных испытаний для обеспечения стабильного качества изготавливаемых конструкций из-за высокой чувствительности процесса к его графику температуры / давления и схемам [1]. Эта особенность делает актуальной разработку систем компьютерного моделирования, позволяющих корректно описывать динамику инфузионного процесса. Сущность процесса и некоторые его разновидности подробно описаны в обзорных и исследовательских работах [2–4]. Процесс вакуумной инфузии в различных его модификациях успешно применяется в авиа-, судо-, автомобилестроении, ветроэнергетике, в производстве космических аппаратов. Области рационального применения большинства разновидностей процесса (VARTM, VAP, RFI, SRCIMP, DP-RTM и др.) подробно классифицированы в работах [5, 6]. Эти разновидности ориентированы на произ-

водство различных видов композитных конструкций, а также на использование специальных средств для ускорения и улучшения насыщения преформы смолой, таких как высокопроницаемые среды (НРМ) и полупроницаемые мембраны [3, 7].

Общий принцип процессов вакуумной инфузии представлен на рис. 1. На поверхность формы укладывают несколько сухих слоев волокна или углеродной ткани и накрывают тонким гибким вакуумным мешком. Затем герметизируют весь технологический пакет, к нему подключают вентиль подачи смолы и вакуумный порт. После включения вакуумного насоса атмосферное давление сжимает пористую заготовку, и жидкая смола начинает двигаться и заполнять сухую преформу из-за разницы давлений внутри нее. К сожалению, во многих случаях эта технология не обеспечивает достаточной повторяемости и качества изготавливаемых деталей. Вариации процесса VARTM и причины ухудшения качества рассматривались во многих теоретических и экспериментальных исследованиях [8].

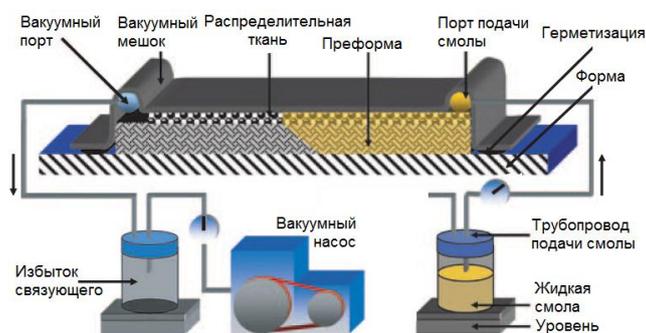


Рис. 1. Схема процессов вакуумной инфузии

Основными технологическими проблемами, препятствующими промышленному внедрению этого процесса, являются медленная или плохо контролируемая пропитка смолой, часто сопровождающаяся образованием сухих пятен, следствием чего являются плохая повторяемость и низкая надежность готовых композитных конструкций [9, 10].

В перечисленных выше работах сообщается, что картина распределения смолы в преформе очень чувствительна к расположению и пропускной способности отверстий для смолы и вакуума, а также к температурному режиму, который определяет изменение вязкости смолы во времени. Поскольку метод проб и ошибок, используемый в производстве, требует значительных затрат времени, средств, и не всегда позволяет получить всю информацию, необходимую для разработки оптимального технологического процесса, усилия ученых и инженеров направлены на разработку адекватного теоретического описания процесса вакуумной инфузии и инструментов для компьютерного моделирования, способных прогнозировать развитие процесса во времени с учетом всех возникающих явлений, включая сжатие преформы атмосферным давлением и уменьшение в результате этого сжатия ее пористости и проницаемости, изменение распределения давления в частично заполненной преформе, а также теплофизических свойств и вязкости смолы, которая зависит от времени, температуры и степени отверждения.

Первое из этих программных средств LIMS, а также разработанные позже системы PAM-RTM, RTM-WORKS, 3DINFIL, RTMSim, Moldex3D RTM, основаны на законе Дарси для зависимости приведенной скорости смолы от градиента рабочего давления и так называемом методе Конечных элементов / Контрольных объемов (FE/CV), основы которого были разработаны в 90-х годах XX века и пред-

ставлены в работе [11]. Несмотря на некоторые улучшения метода FE/CV, такие как использование неявного интегрирования по времени, переопределение геометрии области потока и переразбиение сетки на каждом временном шаге, метод не обеспечивает удовлетворительной точности формы и динамики распространения фронта смолы из-за грубого разбиения сетки контрольных объемов, очень сложного алгоритма расчета граничных условий на фронте потока, высокой чувствительности к размеру временного шага и неудовлетворительной точности описания течения жидкости в ненасыщенной пористой среде законом Дарси.

Значительное улучшение возможностей прямой задачи может быть достигнуто путем прямого моделирования состояния фронта смолы с помощью уравнения фазового поля [12], которое не требует искусственного построения контролируемых объемов, присущих методу FE / CV, а также учетом особенностей распространения жидкой смолы в не полностью насыщенной преформе, описываемой уравнением Ричардса [13], как представлено в [14]. Впервые такой подход был реализован в [15] при решении задачи о границе раздела двух разных жидкостей и в [16] при моделировании процесса вакуумной инфузии. В настоящей работе использован аналогичный подход, дополненный учетом тепловых, кинетических и реологических эффектов на примере процесса вакуумной инфузии преформы со сложной 3D-геометрией.

Текст статьи содержит математическую формулировку связанной задачи моделирования, вывод полуэмпирических соотношений для параметров процесса, обеспечивающих взаимосвязь уравнений задачи, некоторые примеры результатов моделирования процесса вакуумной инфузии трехмерной композитной конструкции с различным расположением, количеством и пропускной способностью портов для подачи смолы и вакуума.

**2. Определяющие уравнения процесса вакуумной инфузии.** Уравнение фазового поля Кана-Хиллиарда [12], которое было принято как ведущее, описывает движение границы между двумя различными фазами (например, А и В).

$$\partial\phi/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla\phi = \nabla \cdot \gamma \nabla G, \quad (1)$$

где фазовая подвижность  $\gamma$  ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) определяет масштаб времени диффузии,  $G$  (Па) – химический потенциал. Переменная фазового поля  $\phi$  описывает концентрации компонентов А и В, которые равны  $(1+\phi)/2$  и  $(1-\phi)/2$ , соответственно. Решением уравнения (1) являются значения  $\phi$  равные +1 или -1, за исключением очень тонкой области на границе раздела двух фаз. Значение переменной  $\phi$  позволяет определить локальное заполнение преформы смолой и относительный объем пустот как  $V_r = (\phi+1)/2$ ;  $V_r \in [0;1]$  и  $V_v = 1 - V_r$ , соответственно.

Граничные условия уравнения фазового поля (1):

Порт подачи смолы:

$$\phi = 1. \quad (2)$$

Стенки заполненного смолой объема:

$$\mathbf{n} \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi = 0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к стенке преформы

Вакуумный порт:

$$\phi = -1. \quad (4)$$

Начальным условием для переменной  $\phi$  во всем объеме преформы  $\Omega$  является  $\phi_\Omega(t=0) = -1$ . Для конечно-элементной (КЭ) реализации процесса вакуумной инфузии крупногабаритной композитной детали были приняты следующие значения параметров задачи:

Ширина интерфейса  $\varepsilon$  для переменной  $\phi$  равна максимальному размеру  $h_{max}$  КЭ разбиения:

$$\varepsilon = h_{max} / 2 = 0.0025 \text{ м} \quad (5)$$

Фазовая подвижность  $\gamma$ :

$$\gamma = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг} \quad (6)$$

Оценка максимальной скорости распространения смолы  $u_{max}$ :

$$u_{max} = 1 \text{ мм/с} \quad (7)$$

Определение приведенной скорости смолы  $\mathbf{u}$  в уравнении (1) производилось путем предварительного расчета поля давлений  $p(x, y, z, t)$  в преформе из уравнения Ричардса [13], преобразованного к форме

$$V_\phi [2\zeta/\pi(1 + (\zeta p)^2)] \cdot \partial p / \partial t - \nabla \cdot ((K/\mu)\nabla p) = 0, \quad (8)$$

где  $V_\phi$  – локальная пористость преформы,  $K$  – проницаемость,  $\mu$  – вязкость смолы, значение  $\zeta = 1/p_{ref}$ , при котором эталонное давление  $p_{ref}$  принимается равным текущему атмосферному давлению  $p_{atm}$ .

Граничные условия уравнения (8) следующие:

Давление смолы в порте (портах) подачи смолы равно атмосферному  $p_{atm}$ :

$$p_{inl} = p_{atm} = 100 \text{ кПа} \quad (9)$$

Давление в вакуумном порте (портах) принято осциллирующим около величины  $p_{vac} = 20$  кПа с периодом 3 мин, что было впервые предложено в работе [16] для определения в ходе моделирования момента времени отделения пустых областей от вакуумного порта:

$$p_{out} = p_{vac} \cdot \left(1 + \frac{1}{4} \sin\left(\frac{2\pi}{180}\right)\right) \text{ кПа} \quad (10)$$

На остальных поверхностях:

$$\mathbf{n} \cdot \nabla p = 0. \quad (11)$$

Начальным условием для увлекающего смолу давления во всем объеме заготовки  $\Omega$  является  $p(x, y, z, 0) = p_{vac}$ .

Эволюция процесса полимеризации смолы описывалась автокаталитическим уравнением, которое учитывает ее движение в процессе непрерывного изменения степени полимеризации  $\alpha$  [17]:

$$\begin{cases} \partial \alpha / \partial t = A_2 \cdot (w \cdot \Xi_1 + \Xi_2 \cdot \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n + (K/\mu) \nabla p \cdot \nabla \alpha, \\ \Xi_i = \exp(-E_i/(RT)); \quad i = 1, 2. \end{cases} \quad (12)$$

Все коэффициенты уравнения (12), определенные для смолы Toray ER450 экспериментально методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) по методике [18], представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты уравнения (2.14) для эпоксидной смолы Toray ER450

Весовые коэффициенты		Энергии активации, Дж/кмоль		Степени		Газовая константа, Дж/(К*кмоль)
$A_2, \text{с}^{-1}$	$w$	$E_1,$	$E_2$	$m$	$n$	$R$
0.095	0.086	$2.3858 \cdot 10^7$	$6.412 \cdot 10^6$	2.06	1.85	8310

Уравнение (12) определено в подобласти  $\Omega$ , где  $V_r \geq 0.01$ . Граничное условие для степени полимеризации  $\alpha$  на входе (входах) смолы зависело от используемого температурного режима, и на других границах:

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \alpha = 0. \quad (13)$$

Процесс теплообмена в пропитываемой смолой преформе моделировался с использованием уравнения теплопроводности

$$\rho_{pr} C_{pr} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_{pr} \nabla T) = Q_{exo}, \quad (14)$$

где  $\rho_{pr}$  – массовая плотность преформы,  $C_{pr}$  – удельная теплоемкость преформы и  $k_{pr}$  – ее коэффициент температуропроводности на всех этапах заполнения смолой. Интенсивность  $Q_{exo}$  объемного источника тепла, вызванного экзотермией полимеризации, зависела от скорости отверждения смолы и от заполненности  $V_r$  пористой преформы смолой

$$Q_{exo} = Q_{tot} \rho_r (1 - V_f) \cdot V_r \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \quad (15)$$

где  $Q_{tot} = 0.106 \cdot 10^6$  Дж/кг – количество тепла, выделяющееся при полимеризации единицы объема смолы,  $\rho_r = 1200$  кг/м<sup>3</sup> – массовая плотность смолы и  $V_f = 1 - V_\phi$  – относительная объемная доля армирующих волокон, которая изменяется в процессе продвижения смолы.

Для получения формулировки прямой связанной задачи в замкнутой форме были определены зависимости параметров системы, входящих в определяющие уравнения (1), (8), (12), (14). Соответствующие процедуры представлены в следующем разделе.

**3. Связь уравнений модели.** Атмосферное давление, приложенное к поверхности гибкого вакуумного мешка, уплотняет частично заполненную преформу, изменяя ее пористость и проницаемость. Это давление сжатия зависит от внутреннего давления при заполнении преформы смолой [4, 19]

$$p_{comp}(\mathbf{r}) = p_{atm} - p(\mathbf{r}). \quad (16)$$

Первое эмпирическое описание процесса компактирования преформы было дано Gutowski et al. в работе [20]

$$V_f = V_{f_0} \cdot p_{comp}^B, \quad (17)$$

где  $V_{f_0}$  – объемная доля волокна при 1.0 Па, а  $B$  – показатель степени жесткости, который зависит от архитектуры волокна. В ряде работ экспериментально доказано, что сжимаемость сухой и влажной преформ существенно различается, но может быть описана соотношением типа (17) [4] с разными параметрами  $V_{f_0}, B$ .

Для получения требуемых соотношений, характеризующих сжимаемость используемой преформы, были заимствованы экспериментальные данные из [21], полученные при исследовании преформы из разнонаправленных углеродных тканей с аналогичными свойствами. Результирующие эмпирические зависимости для сжимаемости преформ в сухом (18.1) и полностью пропитанном (18.2) состоянии представлены ниже вместе с моделью сжимаемости частично смоченной преформы (18.3), полученной с использованием правила смесей.

$$V_f^{dry}(p_{comp}) = a \cdot p_{comp}^b + c; \quad [a; b; c] = [0.03; 0.131; 0.403], \quad (18.1)$$

$$V_f^{wet}(p_{comp}) = A \cdot p_{comp}^B + C; \quad [A; B; C] = [0.098; 0.093; 0.303], \quad (18.2)$$

$$V_f^{dry-wet}(p_{comp}) = (1 - V_r) \cdot V_f^{dry}(p_{comp}) + V_r \cdot V_f^{wet}(p_{comp}). \quad (18.3)$$

Представленный здесь и ниже подход, который позволяет использовать правило смесей для сред, распространяющихся в преформе – воздуха и жидкой смолы, – основан на следующем предположении. Прежде всего, он не учитывает процессы взаимодействия между двумя названными средами, в частности, явление диффузии, что подразумевает возможность усреднения с учетом относительного содержания каждой среды в занимаемом объеме.

При инъекции жидкой смолы в пористую преформу геометрия фронта и характер ее распространения определяются тензором проницаемости ткани [3–6]. Однако удовлетворительная оценка проницаемости многослойной ткани представляет собой сложную проблему, поскольку разные экспериментальные методы в разных лабораториях могут отличаться на целый порядок для одного и того же материала. Реальный прототип моделируемой преформы содержал 12 слоев углеродной ткани TORAY® CO6347B саржевой плетеной структуры 2/2, укладываемых по схеме [60; -30; 30; -60; 0; 90]s, образуя симметричный сбалансированный ламинат толщиной ~ 3,2 мм (до впрыска смолы), используемый при изготовлении деталей, не несущих значительных нагрузок. Трансверсальная изотропия его проницаемости в плоскости была подтверждена в экспериментах с радиальным потоком, когда смола вводилась в форму через центральное впускное отверстие, и распространялась, образуя круговой фронт. В настоящем исследовании предполагалось, что проницаемость ткани изотропна, что было обосновано на результатах эксперимента и анализа размерностей процесса [3]. Для зависимости проницаемости преформы от пористости или объемной доли волокна использовалось уравнение Козени-Кармана

$$K = \tilde{k} \cdot (1 - V_f)^3 / V_f^2, \quad (19)$$

применимое для расчета как продольной, так и поперечной проницаемости, что было установлено многими экспериментальными исследованиями [3, 4, 10, 19] стекло- и углепластиковых преформ. При этом, как показало сравнение справочных данных, соотношение (19) с коэффициентом  $\tilde{k} = 2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  могло быть применимо как для воздуха, так и для жидкой смолы различной вязкости.

В численных экспериментах использовался следующий закон температуры окружающей среды, действующей на преформу конвективным тепловым потоком

$$T(t) = T^{in} + (T^{hold} - T^{in}) \cdot \tanh^2(t/\tau), \quad (20)$$

где  $T^{in}$  – температура смолы, нагретой непосредственно перед вводом в преформу,  $T^{hold}$  – температура длительной изотермической выдержки,  $\tau$  – постоянная времени, определяющая скорость установления температуры, принятая равной 5 мин. Для описания поведения вязкости  $\mu$  смолы от времени  $t$ , температуры  $T(t)$  и степени полимеризации  $\alpha$  использовалась модель Кастро-Макоско, модернизированная с целью исключения разрыва в момент начала желатинизации смолы

$$\mu(T, \alpha, t) = \mu_0(T^{in}) \cdot \exp(\nu_1 \cdot (T(t) - T^{in}) + \nu_2 \cdot \alpha(T, t)), \quad (21)$$

где  $\mu_0(T^{in})$  – вязкость смолы в момент ее ввода в преформу,  $T(t)$  – текущая температура и  $\alpha(T, t)$  – степень полимеризации, соответственно, и  $\nu_1, \nu_2$  – коэффициенты, которые определялись для смолы Toray ER450 путем аппроксимации данных произ-

водителя. Значение степени полимеризации рассчитывалось из уравнения (12) с учетом ее начального значения. Соответствующие графические зависимости для смолы, нагреваемой от 20 °С до различных температур  $T^{hold}$  приведены на рис. 2.

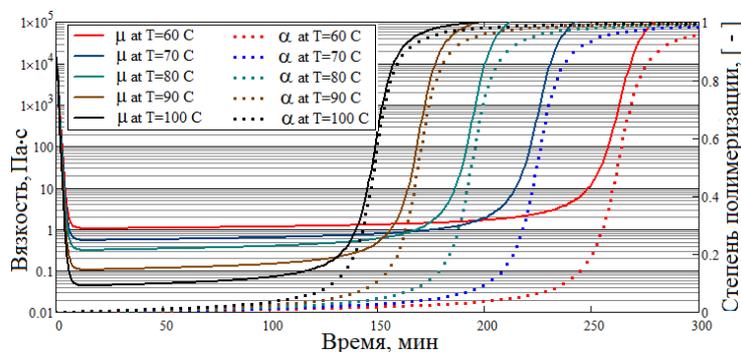


Рис. 2. Изменение степени полимеризации  $\alpha(T, t)$  (12) и вязкости  $\mu(T, \alpha, t)$  (21) смолы Toray ER450 во времени при нагреве по закону (20)

Модельное описание теплофизических свойств заполняемой преформы – массовой плотности  $\rho_{pr}$ , теплоемкости  $c_{pr}$ , температуропроводности  $k_{pr}$ , основывалось на правиле смесей, меняющихся в процессе объемных и массовых фракций армирующих волокон, смолы и воздуха, а также данных производителя компонентов композита [22] и табличных зависимостей для воздуха.

**4. Численные эксперименты. Результаты и дискуссия.** Рассмотренная постановка задачи, реализованная в пакете КЭ моделирования Comsol Multiphysics 5.5, использовалась для поиска оптимального расположения портов поддержания вакуума и подачи смолы, а также для рационального выбора температурного режима, обеспечивающих исключение образования сухих пятен и минимизацию времени заполнения преформы. Ниже представлены некоторые результаты моделирования процесса вакуумной инфузии тонкостенной 3D оболочечной конструкции из углепластика толщиной 3 мм с двумя вырезами - «окнами». CAD-модель конструкции была тщательно переработана, чтобы исключить нарушение непрерывности на стыках участков поверхности и получить удовлетворительное сеточное разбиение без образования сверхмалых и инвертированных элементов вблизи стыков (рис. 3).

Как показано на рис. 4, лента НРМ постоянной ширины была размещена на внешней поверхности преформы по ее периметру для ускорения процесса. Цифры на стрелках указывают расположение портов в рассмотренных схемах процессах, желтые стрелки – порты подачи смолы, а синие стрелки - вакуумные порты. Площадь поперечного сечения портов для всех исследованных случаев принималась неизменной: площадь верхнего левого – 0.63 см<sup>2</sup>, верхнего правого – 0.64 см<sup>2</sup> и нижнего – 0.25 см<sup>2</sup>. В первом случае смола подавалась через нижний порт, а вакуум создавался двумя верхними, тогда как во втором и третьем случаях смола подавалась через два верхних порта (рис. 4). Лента НРМ была смоделирована как функция проницаемости, зависящая от расстояния до стенок, действующая на внешний и внутренний края преформы; проницаемость под лентой НРМ была увеличена в 5 раз. Решение нестационарной задачи было реализовано с шагом по времени 30 секунд от начального состояния до 5 часов. Шаг интегрирования по времени был выбран с учетом периода колебаний давления, создаваемого вакуумным насосом (10), максимальной скорости фронта смолы и размеров элементов КЭ сетки.

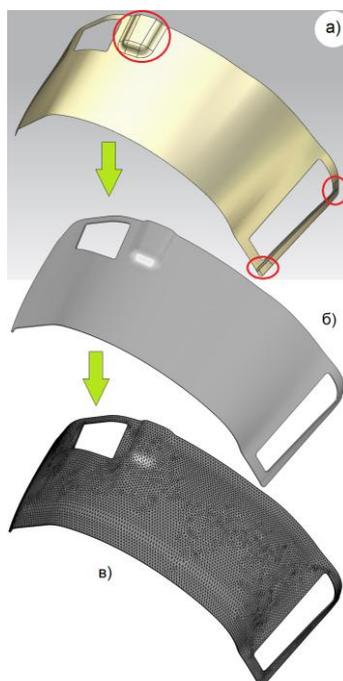


Рис. 3. Переход от CAD к КЭ модели: а – исходная CAD модель; б – CAD модель после удаления стыков; в) КЭ разбиение геометрии, импортированной из CAD модели



Рис. 4. Расположение портов для трех рассмотренных вариантов

На рис. 5–8 показаны снимки распространяющегося фронта смолы, изображенного как геометрические места точек с  $V_r=0,1$  (зеленая линия); 0,5 (желтая) и 0,9 (красная), соответственно для исследованных случаев, где цветовая карта поверхности преформы изображает состояние наиболее важных параметров процесса – степень полимеризации и вязкость смолы. На этих рисунках можно видеть, что степень полимеризации смолы внутри преформы очень мала в течение первых 1,5 часов продолжительности процесса вакуумной инфузии, а состояние смолы достаточно далеко от желатинизации.

Наблюдение за продвижением смолы в случае 1, когда порт подачи смолы находится внизу, а два вакуумных отверстия расположены сверху, демонстрирует ситуацию, аналогичную той, что иногда возникает на автомагистрали, когда 4 полосы движения сокращаются до 1 полосы. Перед этим участком образуется пробка. Движение застывающей смолы резко замедляется перед «узкими пере-

мычками» в преформе. Чтобы ускорить распространение смолы и заставить ее проходить «узкие мостики» в состоянии минимальной вязкости на ранней стадии отверждения, расположение портов в случаях 2 и 3 было изменено, как это представлено на рис. 4.

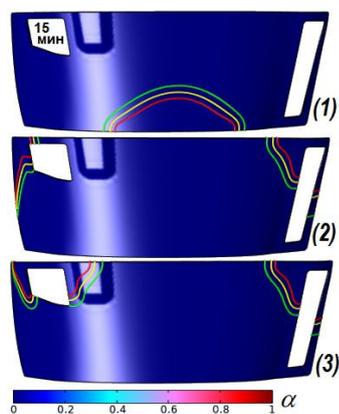


Рис. 5. Расположение фронта смолы после 15 минут процесса для вариантов 1,2,3

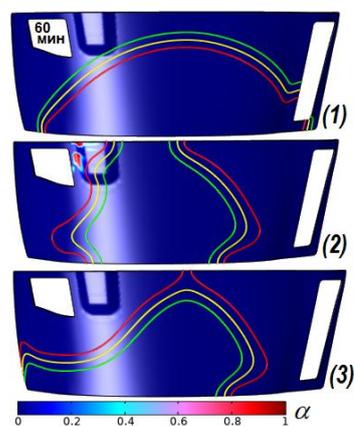


Рис. 6. Расположение фронта смолы после 60 минут процесса для вариантов 1,2,3

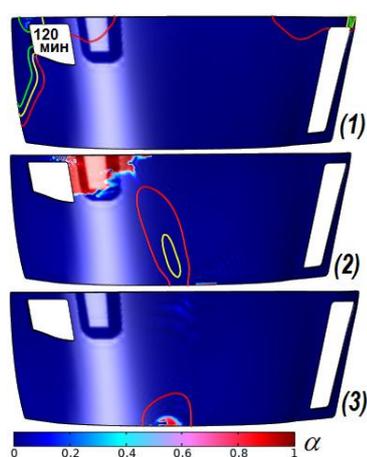


Рис. 7. Расположение фронта смолы после 120 минут процесса для вариантов 1,2,3

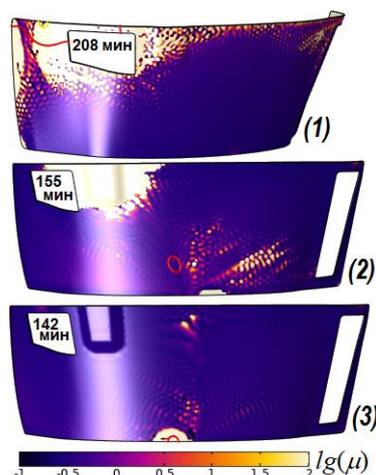


Рис. 8. Расположение фронта смолы и карта распределения вязкости в момент замыкания вакуумного порта для вариантов 1,2,3

Рис. 5–7 изображают распределение степени полимеризации в теле преформы в моменты времени 15, 60, 120 минут, а рис. 8 – распределение вязкости в момент замыкания вакуумного порта, то есть выхода фронта  $V_r=0,9$  за пределы преформы для рассмотренных вариантов. Как видно на рис. 8, завершение процесса заполнения преформы связующим при первой схеме расположения портов происходит значительно позже, чем при второй третьей схемах, и при значительно худших условиях. В момент времени 208 минут левый вакуумный порт оказывается полностью заблокированным отверждающимся связующим, вязкость которого

достигает значения  $100 \text{ Па}\cdot\text{с}$  и более. Таким образом, заполнение всех пустых пор преформы при условиях численного эксперимента №1 невозможно, и результатом будет неисправимый брак формуемой композитной конструкции.

Выбор схемы №3 продиктован необходимостью уравнивать длительность перемещения смолы от обоих верхних портов до вакуумного порта, расположенного внизу. Как видно на рис. 6, 7 поток смолы, инжектируемой из правого верхнего порта, достигает вакуумного порта значительно раньше потока, движущегося слева. Результатом этого является блокирование вакуумного порта правым потоком смолы, значительное замедление скорости удаления воздуха из преформы и образование во внутренней области преформы не полностью насыщенного связующим замкнутого островка. В связи с тем, что уравнению фазового поля присущ механизм диффузии, продолжение симуляции модели №2 после 155 минут может продемонстрировать исчезновение такого ненасыщенного смолой островка за счет диффузии, но тот факт, что со временем скорость распространения смолы в преформе резко снижается за счет падения градиента давления, полимеризации и резкого роста вязкости смолы, свидетельствует о потенциальной опасности ситуации, представленной на рисунке 8.2. Таким образом, из трех рассмотренных вариантов реализации процесса, схема №3, при которой финальный уровень распределения связующего замыкается на вакуумном порте, а общий уровень вязкости в теле преформы минимален, является безусловно лучшей.

Особенностью разработанного инструмента моделирования является возможность мониторинга некоторых интегральных характеристик процесса в ходе симуляции, что позволяет останавливать расчет при появлении признаков возникновения непропитанных замкнутых областей преформы. В числе таких характеристик средние значения степени полимеризации  $\langle \alpha \rangle$ , ее скорости  $\langle \alpha_i \rangle$ , давления  $\langle p_m \rangle$ , вязкости  $\langle \mu \rangle$ , температуры  $\langle T \rangle$  в объеме преформы, заполненном смолой. Дополнительно производится определение среднего значения заполненности смолой в окрестности вакуумного порта  $V_r^{out}$  и относительного незаполненного объема преформы  $V_v$  (рис. 9, 10).

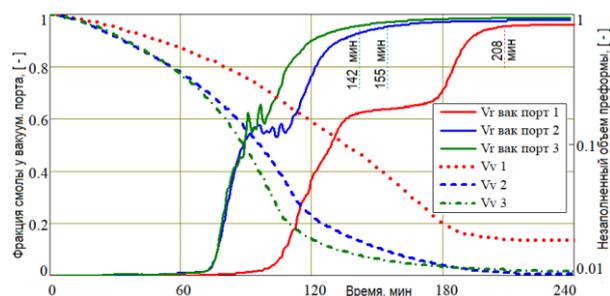


Рис. 9. Временные диаграммы фракции смолы в окрестности вакуумных портов  $V_r^{out}$  и относительного незаполненного объема преформы  $V_v$  для трех исследованных схем процесса

Ступенька на графике  $V_r^{out}$  для первой схемы связана с последовательной блокировкой смолой правого, затем левого вакуумного порта. Менее выраженная ступенька на графике второй схемы обусловлена одновременным прибытием двух потоков смолы к левому и правому границам вакуумного порта. Оба этих нежелательных явления, замедляющих процесс заполнения преформы, отсутству-

ют в третьей схеме процесса. Дополнительным фактором, подтверждающим достижение требуемого качества процесса при его третьей схеме, является небольшой рост давления (то есть рост насыщения смолой) даже после 4 часов с момента старта инфузии.

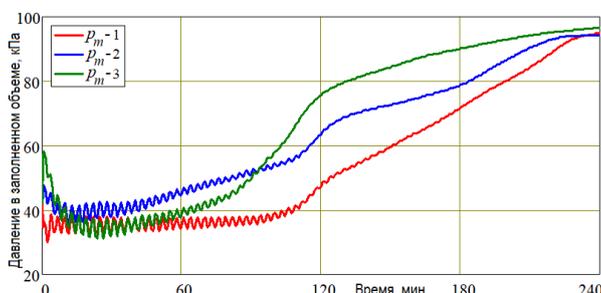


Рис. 10. Временные диаграммы зависимости давления в области преформы, заполняемой смолой, для трех исследованных схем процесса

**Выводы.** Представленные в статье три примера моделирования вакуумной инфузии композитной конструкции при различных схемах расположения портов подачи смолы и вакуума показали, что разработанные средства моделирования позволяют моделировать технологию инфузии при изготовлении композитных деталей сложной формы с высокой точностью и приемлемой вычислительной трудоемкостью. Как показывают скриншоты процесса и графики на рисунках 8, 9, продолжительность процесса до полной его остановки может быть значительно сокращена: от 60 до 70 % в результате оптимального выбора схемы процесса. При этом основной показатель качества - остаточный объем воздуха в преформе может быть снижен в 3 и более раз. Другой важный вывод касается вычислительной трудоемкости и продолжительности моделирования до получения надежного прогноза показателей качества и трудоемкости реального процесса. Сопоставление рисунков 7 и 8 показывает, что худшая из схем №1 уже при симуляции 120 минут протекания инфузионного процесса демонстрирует присутствие в преформе уровня заполненности 0,1 (фронт зеленого цвета) и менее, тогда как при реализации лучшей схемы №3 уровень заполненности смолой 0,9 через 2 часа после начала процесса уже приближается к выходу из преформы. Этот факт демонстрирует не только лучший показатель качества и производительности процесса при реализации схемы №3, но и возможность предсказания результатов процесса на более ранней стадии, что значительно сокращает машинное время работы системы моделирования и обеспечивает возможность ее эффективного использования под управлением оптимизационных алгоритмов. Разработка может быть использована как элемент системы многокритериальной оптимизации, а также автономно при разработке технологии производства ответственных композитных конструкций авиационного применения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смотров С.А., Наумов С.М., Смотров А.В. Технологии изготовления силовых агрегатов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. – М.: Техносфера, 2015. – 215 с.
2. Osborne T. An introduction to resin infusion // Reinforced Plastics. – 2014. – Vol. 58, No. 1. – P. 25-29.
3. Hsiao K.T., Heider D. Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites // Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs). – Woodhead Publishing, 2012. – P. 310-347.

4. *Shah D.U., Clifford M.J.* Compaction, permeability and flow simulation for liquid composite moulding of natural fibre composites // *Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites.* – Springer, Cham, 2015. – P. 65-99.
5. *Garschke C. et al.* Out-of-autoclave cure cycle study of a resin film infusion process using in situ process monitoring // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2012. – Vol. 43, No. 6. – P. 935-944.
6. *Summerscales J.* Resin infusion under flexible tooling (RIFT) // *Wiley Encyclopedia of composites.* – 2011. – P. 1-11.
7. *Govignon Q. et al.* Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2008. – Vol. 39, No. 9. – P. 1412-1426.
8. *Matveev M.Y. et al.* A numerical study of variability in the manufacturing process of thick composite parts // *Composite Structures.* – 2019. – Vol. 208. – P. 23-32.
9. *Bertling D., Kaps R., Mulugeta E.* Analysis of dry-spot behavior in the pressure field of a liquid composite molding process // *CEAS Aeronautical Journal.* – 2016. – Vol. 7, No. 4. – P. 577-585.
10. *Hu W., Centea T., Nutt S.* Effects of material and process parameters on void evolution in uni-directional prepreg during vacuum bag-only cure // *Journal of Composite Materials.* – 2020. – Vol. 54, No. 5. – P. 633-645.
11. *Bruschke M.V., Advani S.G.* A numerical approach to model non-isothermal viscous flow through fibrous media with free surfaces // *International Journal for numerical methods in fluids.* – 1994. – Vol. 19, No. 7. – P. 575-603.
12. *Cahn J.W., Hilliard J.E.* Free energy of a nonuniform system. I. Interfacial free energy // *The Journal of chemical physics.* – 1958. – Vol. 28, No. 2. – P. 258-267.
13. *Richards L.A.* Capillary conduction of liquids through porous mediums // *Physics.* – 1931. – Vol. 1, No. 5. – P. 318-333.
14. *Van Genuchten M.T.* A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil science society of America journal.* – 1980. – Vol. 44, No. 5. – P. 892-898.
15. *Zhou C. et al.* 3D phase-field simulations of interfacial dynamics in Newtonian and viscoelastic fluids // *Journal of Computational Physics.* – 2010. – Vol. 229, No. 2. – P. 498-511.
16. *Shevtsov S. et al.* Experimental and Numerical Study of Vacuum Resin Infusion for Thin-Walled Composite Parts // *Applied Sciences.* – 2020. – Vol. 10, No. 4. – P. 1485-1510.
17. *Wei B.J. et al.* Model-assisted control of flow front in resin transfer molding based on real-time estimation of permeability/porosity ratio // *Polymers.* – 2016. – Vol. 8, No. 9. – P. 337.
18. *Wu J.-K. et al.* Identification of thermoset resin cure kinetics using DSC and genetic algorithm // *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electric Engineering (ISEEE), Sapporo, Japan, 26-28 Apr. 2014.* – P. 1-14.
19. *Govignon Q., Bickerton S., Kelly P.A.* Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete resin infusion process // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2010. – Vol. 41, No. 1. – P. 45-57.
20. *Gutowski T.G. et al.* Consolidation experiments for laminate composites // *Journal of Composite Materials.* – 1987. – Vol. 21, No. 7. – P. 650-669.
21. *Grimley B.W. et al.* Preform characterization in VARTM process model development // *Proceedings of the 36th International SAMPE Technical Conference, San Diego, US, 15-18 Nov. 2004.* – P. 1-14.
22. *Joven R., Minaie B.* Thermal properties of autoclave and out-of-autoclave carbon fiber-epoxy composites with different fiber weave configurations // *Journal of Composite Materials.* – 2018. – Vol. 52, No. 29. – P. 4075-4085.

## REFERENCES

1. *Smotrova S.A., Naumov S.M., Smotrov A.V.* Tekhnologii izgotovleniya silovyykh agregatov aviatsionnykh konstruksiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Technologies for manufacturing power units of aircraft structures made of polymer composite materials]. Moscow: Tekhnosfera, 2015, 215 p.
2. *Osborne T.* An introduction to resin infusion, *Reinforced Plastics*, 2014, Vol. 58, No. 1, pp. 25-29.

3. Hsiao K.T., Heider D. Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites, *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Woodhead Publishing, 2012, pp. 310-347.
4. Shah D.U., Clifford M.J. Compaction, permeability and flow simulation for liquid composite moulding of natural fibre composites, *Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites*. Springer, Cham, 2015, pp. 65-99.
5. Garschke C. et al. Out-of-autoclave cure cycle study of a resin film infusion process using in situ process monitoring, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, Vol. 43, No. 6, pp. 935-944.
6. Summerscales J. Resin infusion under flexible tooling (RIFT), *Wiley Encyclopedia of composites*, 2011, pp. 1-11.
7. Govignon Q. et al. Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, Vol. 39, No. 9, pp. 1412-1426.
8. Matveev M.Y. et al. A numerical study of variability in the manufacturing process of thick composite parts, *Composite Structures*, 2019, Vol. 208, pp. 23-32.
9. Bertling D., Kaps R., Mulugeta E. Analysis of dry-spot behavior in the pressure field of a liquid composite molding process, *CEAS Aeronautical Journal*, 2016, Vol. 7, No. 4, pp. 577-585.
10. Hu W., Centea T., Nutt S. Effects of material and process parameters on void evolution in uni-directional prepreg during vacuum bag-only cure, *Journal of Composite Materials*, 2020, Vol. 54, No. 5, pp. 633-645.
11. Brusckhe M.V., Advani S.G. A numerical approach to model non-isothermal viscous flow through fibrous media with free surfaces, *International Journal for numerical methods in fluids*, 1994, Vol. 19, No. 7, pp. 575-603.
12. Cahn J.W., Hilliard J.E. Free energy of a nonuniform system. I. Interfacial free energy, *The Journal of chemical physics*, 1958, Vol. 28, No. 2, pp. 258-267.
13. Richards L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, 1931, Vol. 1, No. 5, pp. 318-333.
14. Van Genuchten M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil science society of America journal*, 1980, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898.
15. Zhou C. et al. 3D phase-field simulations of interfacial dynamics in Newtonian and viscoelastic fluids, *Journal of Computational Physics*, 2010, Vol. 229, No. 2, pp. 498-511.
16. Shevtsov S. et al. Experimental and Numerical Study of Vacuum Resin Infusion for Thin-Walled Composite Parts, *Applied Sciences*, 2020, Vol. 10, No. 4, pp. 1485-1510.
17. Wei B.J. et al. Model-assisted control of flow front in resin transfer molding based on real-time estimation of permeability/porosity ratio, *Polymers*, 2016, Vol. 8, No. 9, pp. 337.
18. Wu J.-K. et al. Identification of thermoset resin cure kinetics using DSC and genetic algorithm, *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electric Engineering (ISEEE), Sapporo, Japan, 26-28 Apr. 2014*, pp. 1-14.
19. Govignon Q., Bickerton S., Kelly P.A. Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete resin infusion process, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, Vol. 41, No. 1, pp. 45-57.
20. Gutowski T.G. et al. Consolidation experiments for laminate composites, *Journal of Composite Materials*, 1987, Vol. 21, No. 7, pp. 650-669.
21. Grimsley B.W. et al. Preform characterization in VARTM process model development, *Proceedings of the 36th International SAMPE Technical Conference, San Diego, US, 15-18 Nov. 2004*, pp. 1-14.
22. Joven R., Minaie B. Thermal properties of autoclave and out-of-autoclave carbon fiber-epoxy composites with different fiber weave configurations, *Journal of Composite Materials*, 2018, Vol. 52, No. 29, pp. 4075-4085.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Ю.Ф. Мигаль.

**Хуанг Чун-Пинь** – Южный федеральный университет; e-mail: jas3-3@hotmail.com; г. Ростов-на-Дону, Россия; аспирант.

**Jyun-Ping Huang** – Southern Federal University; e-mail: jas3-3@hotmail.com; Rostov-on-Don; Russia; graduate student.