

УДК 519.876.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНО-ИНФУЗИОННОГО ФОРМОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСТ-ИНФУЗИОННЫХ ВЫРАВНИВАЮЩИХ ДАВЛЕНИЙ

Шевцов С.Н., Жиляев И.В., Снежина Н.Г., Клейменов Н.Д. (Ростов-на-Дону)

### Введение

Все более широкое использование полимерных композитов в различных отраслях промышленности, таких как авиастроение, автомобилестроение, кораблестроение и др., стало причиной исследований и разработок новых технологий, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств, надежности производимых композитных конструкций при одновременном снижении себестоимости и трудозатрат. Детальный анализ современных тенденций в проектировании, производстве композитных конструкций, представленный в фундаментальной монографии [1], содержит также вполне оправдавшийся прогноз основных направлений развития методов моделирования на всех этапах использования полимерных композитов: от концептуального дизайна, оптимизации конструкций и технологий, оценки длительной прочности, климатической стойкости и т.д. Настоящая работа связана с разработкой метода компьютерного моделирования и оптимизации режимов процесса вакуумно-инфузионного формования композитных конструкций, получающего все большее распространение благодаря относительно невысокой себестоимости, возможности использования недорогих средств технологического оснащения, что позволяет значительно сократить сроки внедрения в производство новых и модернизируемых конструкций [2]. Между тем, в ряде работ экспериментально установлено, что процессу присущи такие недостатки, как, например, недостаточная стабильность качества, обусловленная сложностью термо- и гидродинамических процессов в термореактивных связующих, распространяющихся в пористых преформах, а также неравномерностью распределения давлений внутри преформ. Следствием этого являются образование пустых незаполненных связующим зон, локальное повышение пористости, неравномерное распределение удельного объема армирующего компонента и толщины стенок конструкции [3]. Первое и наиболее надежное решение этих проблем предложено в работах [4, 5] группы исследователей, предложивших по завершении заполнения преформы жидким связующим использовать управляемые давления, приложенные к внешней поверхности преформы и к вакуумному порту, из которого выходят излишки жидкой смолы. Их эксперименты подтвердили, что при надлежащем выборе величин и моментов приложения этих управляемых давлений перечисленные выше недостатки процесса могут быть успешно преодолены. Однако технология выбора таких оптимальных режимов процесса до настоящего времени не разработана, что связано, во-первых, с большим объемом экспериментов, затрат времени и материалов, требуемых для поиска необходимого оптимума, и, во-вторых, с отсутствием надежной методики моделирования процесса. Результаты исследований, направленных на поиск методов оптимизации рассматриваемого нестационарного мультифизического процесса постинфузионного выравнивания свойств преформы путем приложения управляемых давлений, представленные в работах [6–9], подтверждают возможность эффективного использования предложенного технологического решения в производственных условиях. Но эти результаты, как экспериментальные, так и теоретические, полученные на малых призматических образцах, не могут быть непосредственно использованы в производственной практике.

Целью представленной работы является создание программного средства моделирования сквозного процесса, включающего собственно вакуумно-инфузионную и постинфузионную стадии применительно к формуемым композитным конструкциям реальных размеров и произвольно сложной геометрии, импортируемой из CAD модели. Модель учитывает весь комплекс процессов, происходящих в распространяющемся связующем (точное описание его фронта, полимеризацию и изменения вязкости в зависимости от времени и температуры, диффузию и конвективное перемещение степени полимеризации) и в пористой преформе (сжимаемость, зависящая от степени увлажнения жидкой смолой, объемная деформация, зависящая от заполненности смолой и внешнего компрессионного давления). Управляемыми параметрами процесса являются температура, величины и моменты приложения давлений к внешней поверхности преформы и в вакуумной магистрали. Результаты использования предложенной методики, проиллюстрированные на примере тонкостенной обшивки с пространственной кривизной и трансверсальной изотропией свойств материала преформы, показали, что достаточно высокое быстродействие (~40 минут) и мощные средства постпроцессинга позволяют использовать разработанный метод, варьируя режимы процесса для их оптимизации и исключения нежелательных ситуаций типа проникновения в преформу воздуха через вакуумный порт.

### 1. Компьютерная модель сквозного процесса вакуумно-инфузионного - пост-инфузионного формования

При формулировании системы определяющих уравнений принимались следующие допущения. Объект моделирования представлял собой пористую преформу, уложенную лицевой стороной на открытую форму, выполненную из полимеризованного углепластика. Тыльная, внешняя сторона преформы, накрытая тонкостенным вакуумным мешком, была подвержена действию атмосферного и управляемого внешнего давления. Поверхности преформы изолированы за исключением портов подачи смолы (inflow) и вакуумной магистрали (outflow), которые соединялись с преформой на ограниченных участках ее боковой поверхности (см. рис. 1а). Материал относительно тонкостенной преформы предполагался трансверсально изотропным, а материал открытой формы – однородным изотропным. В исходном состоянии при неизменности порового давления в теле преформы ее материал предполагался однородным, а все его параметры, включая упругие, тепловые свойства, пористость и проницаемость – постоянными. Для описания анизотропии материала области с искривленными границами вводились локальные криволинейные системы координат, представленные на рисунке 1б.

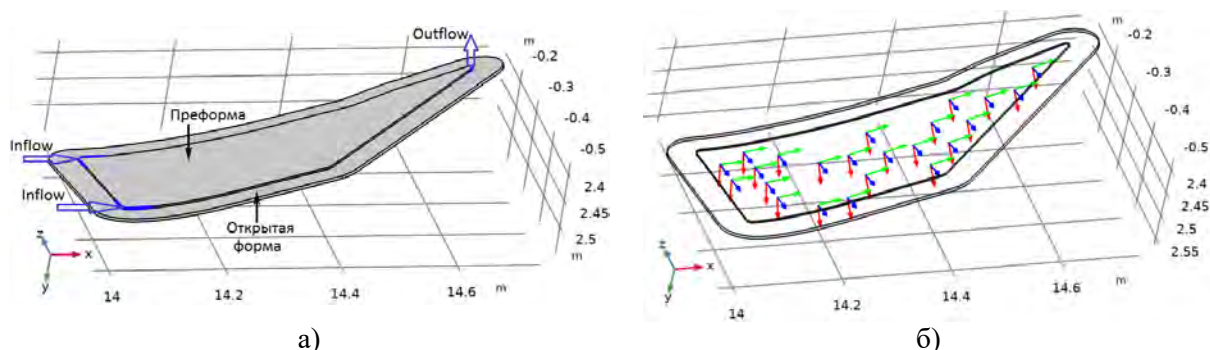


Рис. 1. Геометрия моделируемой области (а) и локальные системы координат, заданные на лицевой поверхности преформы (б)

Имея в виду конечноэлементный (КЭ) метод решения прямой задачи моделирования в системе Comsol Multiphysics 6.1, в систему определяющих уравнений были включены:

- уравнение фазового поля, заданное в теле преформы и описывающее распространение фронта смолы

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

где зависимая переменная  $\varphi \in [-1;1]$  определяет локальную заполненность смолой  $V_r$  согласно  $V_r = (\varphi + 1)/2 \in [0;1]$ ,  $G$  — химический потенциал,  $\gamma$  — подвижность фазы, а  $\mathbf{u}$  — приведенная скорость жидкой смолы;

- уравнение конвекции / диффузии / кинетики (2) для пространственно-временной эволюции степени полимеризации  $\alpha$ ,

$$\partial\alpha/\partial t - ([K]/\mu) \cdot \nabla p \cdot \nabla\alpha - \nabla \cdot (c_\alpha \nabla\alpha) = F(\alpha, t, T), \quad (2)$$

которое объединяет три наиболее важных явления в движущейся терморективной смоле — кинетику полимеризации, диффузию, коэффициент которой  $c_\alpha$  зависит от кинетического и реологического состояния смолы, и перемещение степени полимеризации  $\alpha$  при течении смолы. В этом уравнении член источника  $F(\alpha, t, T)$ , описывающий эволюцию  $\alpha$  от времени и температуры, подчиняется автокаталитическому уравнению, решение которого позволяет определить интенсивность экзотермического источника тепла  $Q_{exo}$

$$Q_{exo} = Q_{tot} \rho_r (1 - V_f) \cdot V_r \cdot \partial\alpha/\partial t, \quad (3)$$

где  $Q_{tot}$  — общее количество тепла, выделяющееся при отверждении единицы массы смолы,  $\rho_r$  — ее массовая плотность и  $V_f$  — относительный объем армирующего компонента в пористой среде, связанный с пористостью  $\phi$  соотношением  $V_f = 1 - \phi$ ;

- заданное в теле преформы уравнение Дарси, связывающее скорость газожидкостной смеси  $\mathbf{u}$  с градиентом давления  $\nabla p$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_{gf}) + \nabla \cdot (\rho_{gf} \mathbf{u}) = Q_m \\ \mathbf{u} = - \frac{[K]}{\mu_{gf}} \nabla p \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\rho_{gf}$  и  $\mu_{gf}$  — массовая плотность и динамическая вязкость движущейся газожидкостной смеси, зависящие от заполненности пор жидкой смолой  $V_r$ ,  $[K]$  — тензор проницаемости пористой среды, принятый в диагональной форме для трансверсально изотропного материала преформы, и  $Q_m$  — характеристика аккумуляции преформой жидкости;

- уравнение теплопроводности, заданное в обоих телах,

$$\rho_{pr} C_{pr} \partial T/\partial t + \nabla \cdot (-k_{pr} \nabla T) = Q_{exo}, \quad (5)$$

где теплофизические свойства преформы: массовая плотность  $\rho_{pr}$ , удельная теплоемкость  $C_{pr}$  и теплопроводность  $k_{pr}$  определяются с помощью правила смесей с использованием термических свойств смолы, сухой преформы, пористости  $\phi$  и локального распределения заполненности смолой  $V_r$  [3].

В связи с тем, что большая часть эволюционирующих параметров процесса зависит от пористости  $\phi$  преформы, а та, в свою очередь, от компрессионного давления  $p_c$ , которое в общем случае является разностью приложенного внешнего  $p_{appl}$  и внутривязкого давления  $p_m$ , выражающейся соотношением

$$p_c = p_{appl} - \alpha_{BW} \cdot p_m, \quad (6)$$

где  $\alpha_{wv} \approx 0.98$  – коэффициент Био-Виллиса [10], принципиально важно количественно охарактеризовать зависимость  $\phi(p_c) = 1 - V_f(p_c)$ . Это полуэмпирическое соотношение было получено экспериментально при испытании на сжатие сухих и увлажненных жидким связующим ЭДТ-10П 8-слойных образцов стеклоткани Т-10-14 (см. рис. 2).

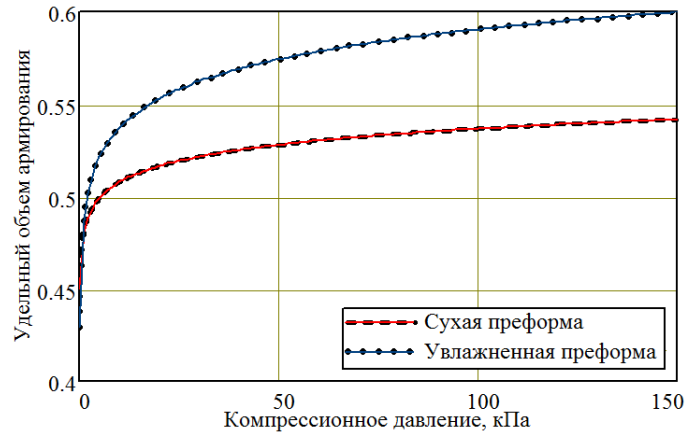


Рис. 2. Сжимаемость сухой и увлажненной преформ

Представленное на рисунке 2 различие сжимаемостей сухой и увлажненной преформ показывает, что корректное определение локальной пористости требует учета локальной заполненности преформы жидкой смолой  $V_r$ , приложенного внешнего  $p_{appl}$  и локального порового давления  $p_m$ . С учетом фиксации нижней границы преформы модуль Юнга в направлении нормальном ее поверхности определяется очевидным соотношением  $Y_n = dp_c(V_f)/dV_f$ , а модуль всестороннего сжатия упругого пористого каркаса  $K_\phi$  выражается через модуль  $Y_n$  соотношением [10]

$$K_\phi = Y_n / (1 - 2\nu_{nt}), \quad (7)$$

где  $\nu_{nt}$  – коэффициент Пуассона, связывающий нормальную  $e_n$  и тангенциальную  $e_t$  компоненты деформации при сжатии. Этот результат позволяет определить обе компоненты деформации как

$$e_n = -p_c / K_\phi; \quad e_t = -\nu_{nt} e_n \quad (8)$$

и величину пористости в результате деформации сжатия (отрицательной)

$$\phi = (\phi_{\max}^0 + e_n) / (1 - e_n) \quad (9)$$

где  $\phi_{\max}^0 \approx 0.57$  – пористость преформы в отсутствие компрессионного давления. В условиях частичной заполненности пор преформы жидким связующим модуль Юнга  $Y_n$  должен определяться по правилу смесей с учетом локального значения параметра  $V_r$  [10].

Нормальная компонента тензора проницаемости  $K_n$ , принятого для трансверсально изотропного материала преформы в диагональном виде, выражается через величину пористости согласно модели Козени-Кармана [10]

$$K_n(\phi) = K_n^0 \cdot \phi^3 / (1 - \phi^2), \quad (10)$$

где  $K_n^0$  – проницаемость, измеренная при минимальной пористости преформы и принятая в настоящей работе равной  $K_n^0 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ . Компоненты проницаемости в тангенциальном направлении к поверхности преформы, приняты в 4 раза большими.

Для зависимости вязкости смолы от степени отверждения вместо модели Кастро-Макоско [2, 6] предложена модель

$$\mu(T, \alpha, t) = \mu_0(T^{in}) \cdot \exp\left(\nu_1 \cdot (T(t) - T^{in}) + \nu_2 \cdot \alpha(T, T^{in}, t)\right) \quad (11)$$

Она лишена разрывов при гелеобразовании смолы, содержит непосредственно измеряемый параметр  $\mu_0(T^{in})$  — вязкость при начальной температуре и всего два коэффициента  $\nu_1, \nu_2$ , которые просто определяются в эксперименте. Уточненная полуэмпирическая зависимость коэффициента диффузии в уравнении (2) учитывает его уменьшение с ростом вязкости смолы и локальную заполненность преформы  $V_r$ :

$$c_\alpha = c_\alpha^0 \cdot \frac{(1 + \tanh((\alpha - 1)/\sigma_\alpha))}{\max(\log_{10}(\mu), 2) - 1} V_r. \quad (12)$$

где значения  $c_\alpha^0 = 0.001$  и  $\sigma_\alpha = 0.15$  определены на основе сопоставления результатов экспериментов и численного моделирования, проведенного с использованием простой одномерной системы инфузии жидкого связующего.

Рассмотренный ниже сценарий численного моделирования предусматривает повышение внешнего давления на свободную поверхность преформы после ее заполнения смолой и давления в вакуумной магистрали при поддержании атмосферного давления  $p_{atm}$  в порте подачи смолы.

## 2. Некоторые результаты моделирования

Важным элементом исследования, предшествующим настройке параметров модели и ее симуляции, является коррекция топологии CAD модели инфузируемой конструкции, включающая исключение стыков элементов поверхности и удаление отверстий, выполняемых на уже полимеризованной конструкции. Типичные примеры таких дефектов приведены на рисунке 3. Процедура коррекции топологии исключает локальные сгущения сетки на стыках и вблизи отверстий, что может резко исказить процесс распространения смолы.

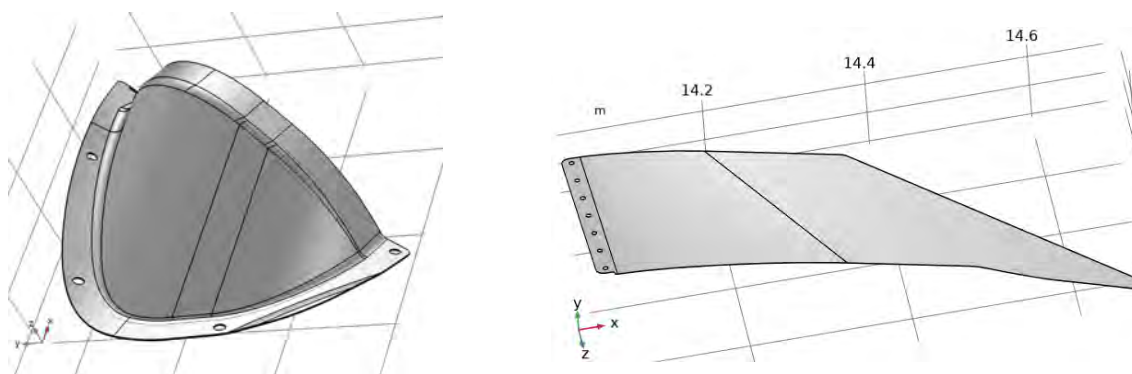


Рис. 3. Примеры CAD моделей композитных конструкций с типичными погрешностями топологии

При моделировании формования тонкостенной композитной конструкции методом вакуумной инфузии геометрия открытой формы копируется с лицевой поверхности будущей детали, причем толщина формы должна быть в 2-3 раза больше толщины формируемой детали. Эти операции выполняются в среде используемой CAD системы, после чего геометрия сборки импортируется в среду КЭ моделирования (см. рис. 1а) и подвергается конечноэлементному разбиению. Чтобы корректно описать неоднородность температурного поля в подогреваемой тонкостенной преформе и влияние этой неоднородности на свойства смолы, число слоев в КЭ модели преформы должно быть не менее трех (см. рис. 4).

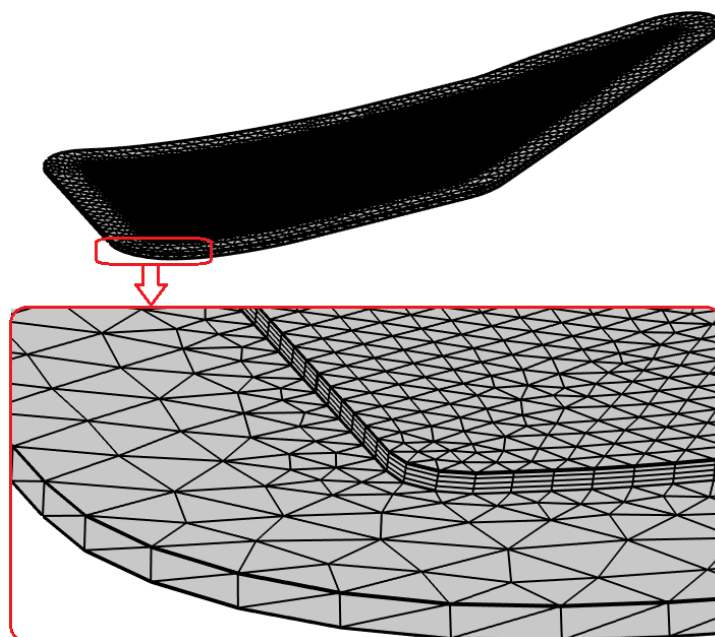


Рис. 4. Конечноэлементное разбиение элементов технологической системы вакуумной инфузии

Разбиение должно выполняться после отделения участков преформы, выделенных под инъекционные и вакуумные порты (выделены синим цветом на рис. 1а). Рассмотрим особенности формирования начальных и граничных условий для уравнений (1), (2) и (4), (5).

На инъекционном порте (портах) в уравнении фазового поля (1) принимается начальное значение фазовой переменной  $\varphi=1$  и поддерживается неизменным, на вакуумном порте –  $\varphi=-1$ . В уравнении (2) принимаются граничные условия Дирихле на значения степени полимеризации  $\alpha$  и ее производной по времени  $\partial\alpha/\partial t$  на инъекционном порте (портах), значения которых назначаются по результатам дифференциальной сканирующей калориметрии при изотермическом нагреве, соответствующем температуре инжектируемой смолы. В данной работе их значения приняты равными  $3.38 \cdot 10^{-4}$  и  $2.14 \cdot 10^{-6}$  1/сек, соответственно. На вакуумном порте принимается граничное условие на поток параметра  $\alpha$  через поверхность порта.

Начальным условием для уравнения теплопроводности является значение температуры  $T^n$ , равной температуре инжектируемой смолы (в приведенных примерах  $T^n=75^{\circ}\text{C}$ ). На всех открытых границах преформы и открытой формы действует конвективный теплообмен с воздухом требуемой температуры, принятой в данной работе равной  $80^{\circ}\text{C}$ . В теле преформы действует источник экзотермического тепла (3).

Начальное условие на давление в уравнении Дарси (4) соответствует давлению  $p_{vac}$  в вакуумной магистрали, удаляющей воздух из преформы перед началом инъекции смолы. Давление в инъекционных портах поддерживается неизменным, равным атмосферному  $p_{atm}$ , а в вакуумном порте изменяется по закону

$$p_{out} = p_{vac} + \Delta p_{out} \cdot \tanh^2\left(\frac{t - t_{out}^{start}}{\delta t_{out}}\right) \cdot (t > t_{out}^{start}) \quad (13)$$

где  $p_{out}$  – регулируемое значение давления в вакуумном порте,  $t_{out}^{start}$  – момент начала роста давления от исходного значения  $p_{vac}$  до  $(p_{vac} + \Delta p_{out})$  и  $\delta t_{out}$  – параметр, характеризующий скорость роста давления. Изменение давления по закону гиперболического тангенса позволяет исключить скачки давления и ухудшение сходимости симуляции. Внешнее давление  $p_{appl}$  в (6) изменяется по аналогичному



закону, но с отличающимися параметрами  $\Delta p_{ext}, t_{ext}^{start}, \delta t_{ext}$ . Начало роста давления в вакуумном порте  $t_{out}^{start}$  может совпадать или запаздывать после начала нарастания внешнего давления  $t_{ext}^{start}$  на некоторый интервал времени  $T_{lag} = t_{out}^{start} - t_{ext}^{start}$ . Ниже приведены графики, изображающие эволюцию параметров вакуумно-инфузионного процесса во времени для четырех режимов управления давлениями (см. рис. 5).

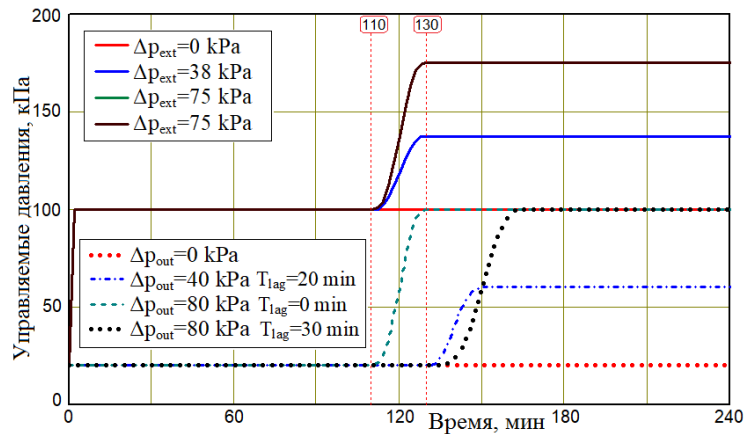


Рис.5. Временные зависимости управляемых давлений – внешнего, приложенного к преформе, и в вакуумном порте для четырех исследуемых режимов

На рисунке 6 изображены временные зависимости средней по преформе относительной доли армирующего компонента для режима без приложения выравнивающих давлений (красная сплошная линия) и трех режимов с различными значениями дополнительных управляемых давлений и началами их приложения, которые всегда производятся по завершении заполнения преформы связующим на 98%. Помещенные в красных прямоугольниках цифры 110 и 130 обозначают моменты начала и завершения роста приложенного к открытой поверхности преформы внешнего давления. Зависимости демонстрируют наибольшее увеличение среднего объема армирования  $\langle V_f \rangle$  до 0.583 по сравнению с традиционным процессом вакуумной инфузии ( $\langle V_f \rangle = 0.522$ ) при повышении внешнего давления до 175 кПа. Зависимость  $\langle V_f \rangle$  для процесса без приложения выравнивающих давлений демонстрирует постепенное снижение, что обусловлено медленным повышением и выравниванием порового давления за счет снижения его градиента.

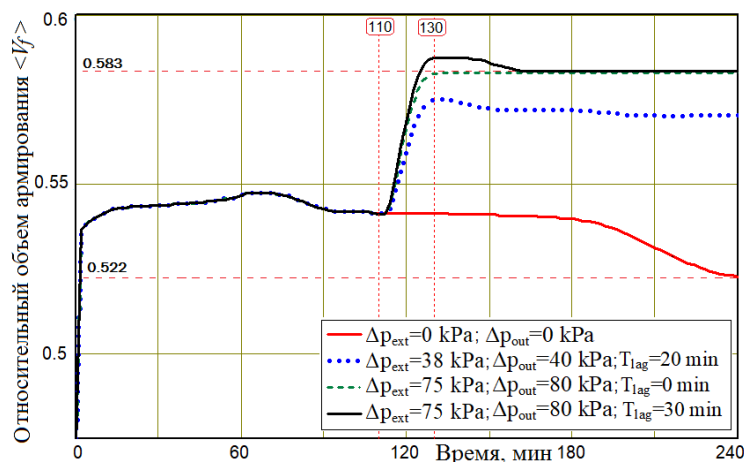


Рис. 6. Временные зависимости усредненных по объему преформы относительных объемов армирующего компонента  $\langle V_f \rangle$  для четырех режимов процесса

Наряду с увеличением среднего объема армирующего компонента  $\langle V_f \rangle$  приложение управляемых давлений  $p_{appl}$  и  $p_{out}$  к преформе приводит к значительному снижению его вариации, т.е. повышению равномерности распределения  $V_f$ , что особенно важно для повышения прочностных свойств инфузируемой конструкции. Аналогично постинфузионное воздействие влияет на толщину преформы  $h$ , определяемую формулой  $h = h_0 \cdot (1 - \phi_{max}^0) / (1 - \phi)$  как представлено на рисунке 8.

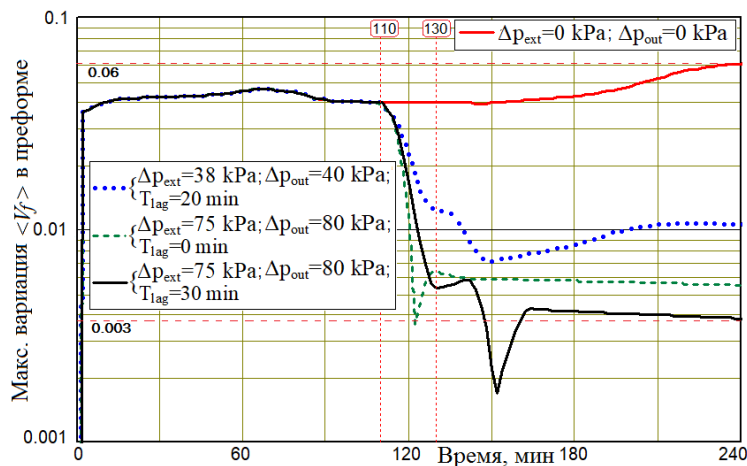


Рис. 7. Временные зависимости максимальной вариации относительных объемов армирующего компонента  $\max(\delta V_f)$

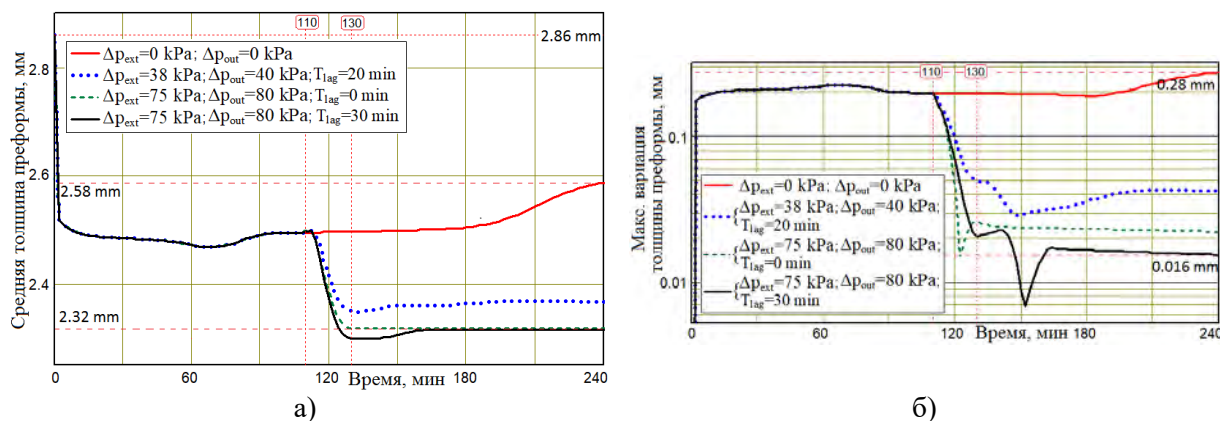


Рис. 8. Временные зависимости средней толщины (а) и максимальной вариации толщины преформы

Сопоставительный анализ динамики течения жидкого связующего через инъекционный порт и газо-жидкостной смеси – через вакуумный порт подтверждает корректность описания моделью физического характера процесса. Представленные на рисунке 9 временные зависимости потоков массы смолы, вводимой в преформу через оба инъекционных порта (сплошные линии), и газо-жидкостной смеси, выходящей через вакуумный порт в ловушку (точечные линии), демонстрируют постепенное снижение величин потоков и их приближение по абсолютной величине после воздействия управляемыми давлениями. Следует отметить, что на третьем и четвертом режимах ( $\Delta p_{ext}=75$  кПа;  $\Delta p_{out}=80$  кПа) в момент скорейшего возрастания внешнего давления ( $t \sim 120$  мин) поток массы смолы через инъекционные порты меняет знак на противоположный, что свидетельствует об обратном истечении смолы из преформы. Диаграммы на рисунке 9 б показывают, что постинфузионное приложение управляемых давлений значительно ускоряет завершение процесса. Так, на режиме 3



(зеленые линии) остановка происходит в момент  $t=130$  мин, на режиме 4 (черные линии) – в момент  $t=165$  мин, тогда как в отсутствие внешних давлений (красные линии) процесс может продолжаться после 4-х часов. Однако возможность завершения течения и выравнивания состояния связующего зависит от его вязкости в теле преформы и, главным образом, вблизи вакуумного порта, который может быть заблокирован смолой, находящейся в стадии желатинизации. Характер изменения вязкости связующего вокруг вакуумного порта, представленный для четырех исследованных режимов на рисунке 10, показывает, что по истечении 2,5 часов для режимов 3 и 4 вязкость смолы остается достаточной для течения, тогда как через 4 часа без приложения пост-инфузионных управляемых давлений вязкость смолы соответствует вязкости охлажденного касторового масла, что может заблокировать вакуумный порт и остановить процесс выравнивания давлений.

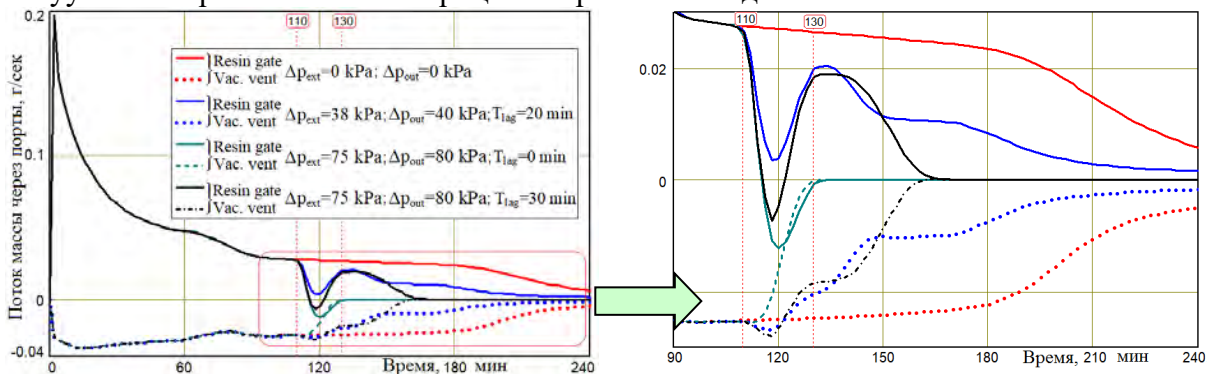


Рис. 9. Временные зависимости потоков массы через инъекционные и вакуумный порт

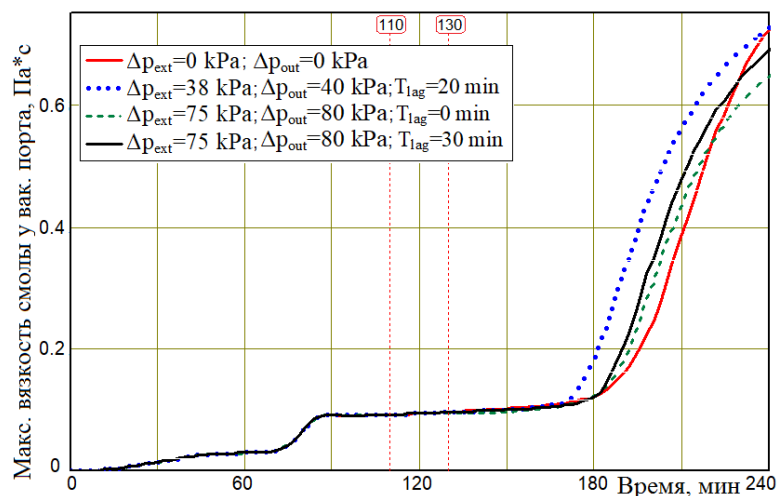


Рис. 10. Временные зависимости вязкости смолы, окружающей вакуумный порт

### 3. Обсуждение результатов

Представленные выше результаты численных экспериментов убедительно показывают, что технологическое решение, заключающееся в использовании управляемых давлений – прилагаемого к открытой поверхности инфузируемой преформы и независимо регулируемого давления в вакуумном порте, позволяют значительно улучшить такие показатели качества процесса, как повышенная величина и равномерность распределения удельного объема армирующего компонента, что непосредственно влияет на прочностные свойства производимой композитной конструкции. Это решение обеспечивает также однородность распределения толщины стенок во всем теле крупногабаритной конструкции. Анализ характера потоков

связующего через порты подтверждает важность рационального выбора режимов процесса, включая величины давлений, моменты и скорости их приложения. Кроме того, моделирование с использованием надежных экспериментальных зависимостей свойств связующих и пористых преформ позволяет предсказать и исключить возникновение нежелательных ситуаций, таких, например, как проникновение воздуха в преформу через вакуумные порты, блокирование вакуумных портов отверждающимся связующим и возникновение, вследствие этого, зон с повышенной пористостью. Рассмотренная технология обеспечивает также значительно более высокую производительность. Однако для ее реализации необходимо использование дополнительных средств технологического оснащения, включая средства управляемого нагрева преформ, приложения к ним и контроля управляемых давлений.

### **Заключение**

Представленные в работе особенности построения и результаты работы средства КЭ моделирования позволяют обоснованно разрабатывать усовершенствованную вакуумно-инфузионную технологию производства тонкостенных полимер-композитных конструкций с повышенными требованиями к кратковременной, длительной прочности и точности геометрии, что обеспечивается возможностью создания в теле инфузируемых преформ максимально достижимого значения и равномерного распределения удельного объема армирующего компонента. Материальные затраты, связанные с оснащением дополнительным технологическим и испытательным оборудованием, вполне могут быть компенсированы повышенными производительностью процесса и качеством готовой продукции. Разработанное средство имитационного моделирования, продемонстрировавшее время симуляции одного варианта процесса типа представленного выше около 40 минут на ПК с процессорами класса i7 и около 15 минут на платформе Ricor R (на базе двух процессоров Intel Xeon Silver 4210 R, ОЗУ 1Тб), позволяет резко сократить затраты на многократное повторение методом проб и ошибок длительных экспериментов с дорогостоящими компонентами. В настоящее время представленная технология моделирования осваивается в специализированной лаборатории ПАО «Роствертол».

Авторы выражают искреннюю благодарность за финансовую и аппаратно-техническую поддержку Российской академии наук (ГЗ ЮНЦ РАН РАН № ААА-А-А16-116012610052-3 «Исследование состава, структуры, свойств и технологических процессов создания композиционных покрытий и конструкций триботехнического и аэрокосмического назначения») и ПАО «Роствертол» (НИР №13-23-УНИ «Исследование, отработка вакуумно-инфузионной технологии изготовления деталей формообразующей оснастки из композитных материалов»).

### **Литература**

1. **Baker A.A.** Composite materials for aircraft structures. – AIAA, 2004.
2. Ekuase O. A. et al. A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing // Journal of Composites Science. – 2022. – Т. 6. – № 6. – С. 172.
3. **Shevtsov S. et al.** Two-stage numerical approach for reliable recognition of dry spots at the VAP infusion of large composite parts of complex shape // Composite Structures. – 2021. – Т. 259. – С. 113437.
4. **Yalcinkaya M., Murat Sozer E.** Effect of part thickness variation on the mold filling time in vacuum infusion process // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2014. – Т. 33. – № 23. – С. 2136-2150.

5. **Yalcinkaya M.A., Sozer E.M., Altan M.C.** Dynamic pressure control in VARTM: Rapid fabrication of laminates with high fiber volume fraction and improved dimensional uniformity // *Polymer Composites*. – 2019. – Т. 40. – № 6. – С. 2482-2494.
6. **Gajjar T. et al.** Experimental study of thickness gradient and flow simulation in VARTM process // *Fibers and Polymers*. – 2020. – Т. 21. – № 2. – С. 384-391.
7. **Wu D., Larsson R., Blinzler B.** A preform deformation and resin flow coupled model including the cure kinetics and chemo-rheology for the VARTM process // *International Journal of Material Forming*. – 2021. – Т. 14. – № 3. – С. 421-434.
8. **Rubino F. et al.** Filling Time Reduction in Liquid Composite Molding Processes // *Journal of Composites Science*. – 2022. – Т. 6. – № 8. – С. 222.
9. **Zhilyaev I. et al.** Preform Porosity and Final Thickness Variability Prediction after Controlled Post-Infusion External Pressure Application with the FEA Model // *Journal of Composites Science*. – 2022. – Т. 6. – № 12. – С. 361.
10. **Cheng A.H.D.** Poroelasticity. Theory and Applications of Transport in Porous Media. – Springer International Publishing: Switzerland, 2016. – 893 с.