

**ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА ИМПРЕГНИРОВАНИЯ
В СИНТЕЗЕ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ***

**INFLUENCE OF DYNAMIC IMPACT
ON THE KINETICS OF THE IMPREGNATION PROCESS
IN THE SYNTHESIS OF A POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL**

C.B. EPШOB, E.H. KALININ, V.B. KUZNETSOV, C.A. KOKШAPOB, И.А. СУВОPOB
S.V. ERSHOV, E.N. KALININ, V.B. KUZNETSOV, S.A. KOKSHAROV, I.A. SUVOROV

**(Ивановский государственный политехнический университет,
Институт химии растворов РАН им. Г.А. Крестова, г. Иваново)**

**(Ivanovo State Polytechnical University,
G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo)**

E-mail: ershovsv.iv@yandex.ru; enkalini@gmail.com; kuznetsovtex@gmail.com;
ksa@isc-ras.ru; suvorov@live.ru

Приведены результаты численного моделирования кинетики процесса импрегнирования армирующей капиллярно-пористой структуры вязким связующим, дающие возможность прогнозирования задаваемых структурных параметров синтезируемого композитного полимерного материала. Получены графические зависимости кинетики импрегнирования связующего в капиллярно-пористой структуре при различных значениях частот генерирования динамического режима процесса в форме ультразвуковых колебаний для различных коллоидных композиций связующего, динамической пористости армирующей компоненты, с величинами перепада давления на единичной длине диффузии применительно к методам получения полимерного композитного материала.

The results of numerical simulation of the impregnation process kinetics of a reinforcing capillary-porous structure with a viscous binder are presented, making it possible to predict the given structural parameters of the synthesized composite polymer material. The graphical dependences of the impregnation kinetics of the binder in the capillary-porous structure at various frequency values of the dynamic mode of the process generating in the form of ultrasonic vibrations for various colloidal compositions of the binder, the dynamic porosity of the reinforcing component, with the values of the pressure drop at a unit length of diffusion as applied to the methods of obtaining a polymer composite material have been obtained.

Ключевые слова: численное моделирование кинетики процесса импрегнирования армирующей капиллярно-пористой структуры вязким связующим, генерирование динамического режима процесса в форме ультразвуковых колебаний для различных коллоидных композиций связующего, критериальная форма зависимостей процесса импрегнирования.

* Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ по проекту 20-43-370007/20 Ивановская область, "Развитие научных основ прогнозирования функциональных и конструкционных параметров синтезируемых полимерных волокнистых композитных систем".

Keywords: numerical modeling of the impregnation process kinetics of a reinforcing capillary-porous structure with a viscous binder, generation of a dynamic mode process in the form of ultrasonic vibrations for various colloidal compositions of the binder, criterial form of the impregnation process dependences.

Введение

Оптимизация функции селективности армирующей структуры композитной системы как мезофльтрационной перегородки по отношению к параметрам структуры капиллярно-пористой системы, обеспечивающей процесс массопередачи при импрегнировании вязкой связующей матрицей при формировании полимерного композитного материала (ПКМ) в условиях гидравлического вакуума, создаваемого в армирующей капиллярно-пористой структуре (КПС), обеспечивающего создание движущих сил для заполнения ее объема, при влиянии динамического воздействия на процесс синтеза полимерного композитного материала на основе моделирования переходных состояний системы в функции входных параметров процесса массопередачи является начальным этапом синтеза проблемно-ориентированной численной модели, обеспечивающей прогнозирование заданных конструктивных параметров синтезируемого композитного материала [1], [2], а также прототипирования параметров оборудования для пропитки КПС с оптимальными технико-экономическими показателями на основе сравнительного анализа статического и динамического характеристик кинетики, в том числе процессов импрегнирования при синтезе ПКМ.

Целью анализа динамического воздействия на кинетику импрегнирования при формировании ПКМ является сравнительный анализ:

- кинетических параметров процесса пропитки КПС армирующей компоненты вязким связующим при свободном ламинарном течении при статическом и динамическом колебательном воздействии на упруговязкую систему, образующую ПКМ;
- влияния структурных параметров КПС армирующей компоненты на ее гидродинамические параметры при массопередаче упруговязкой фазы в процессе импрегнирования капиллярно-пористой структуры ар-

мирующей компоненты;

- параметров аппаратных средств амплитудно-фазочастотных характеристик (АФЧХ) импрегнирующего – пропиточного аппаратного обеспечения и процесса, способствующих интенсификации процесса заполнения КПС ПКМ.

Основная часть

Возможность получения аналитических решений поставленной задачи связана с введением весьма существенных допущений, с дискретизацией вычислительных процессов в пространстве и во времени, существенно снижающих универсальность численных моделей, а также их адекватность в процедурах прогнозирования выходных параметров исследуемых процессов.

С учетом закономерностей процесса импрегнирования объем Q связующего, проходящего через КПС армирующей компоненты ПКМ в единицу времени, определится как пропускная способность КПС:

$$Q = \frac{K_n P_f}{\mu H} \delta, \quad (1)$$

где P_f – перепад давлений (гидравлический вакуум) в КПС армирующей компоненты ПКМ, Па; H – толщина КПС армирующей компоненты ПКМ – путь течения связующего через армирующую составляющую, м; δ – полная площадь поперечного сечения потока связующего, м²; μ – динамическая вязкость связующего, Па·с; K_n – коэффициент проницаемости КПС армирующей компоненты, м².

Процесс импрегнирования по аналогии с процессом фильтрования представляет собой сложный массообменный гидродинамический процесс, описываемый в виде движения связующей через КПС наполнителя, обладающую фильтрующими характеристиками. При ламинарном режиме такое течение описывается уравнением Дарси в форме [3]:

$$Q = \frac{K_{\phi} S \Delta h}{H}, \quad (2)$$

где Q – пропускная способность КПС армирующей компоненты ПКМ, $\text{м}^3/\text{с}$; K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, $\text{м}/\text{с}$; S – площадь поверхности КПС в горизонтальной плоскости армирующей компоненты ПКМ, м^2 ; Δh – потери напора потока в КПС армирующей компоненты ПКМ, м ; H – толщина слоя КПС, м .

Так как входящий в формулу коэффициент фильтрации K_{ϕ} определяется экспериментально и зависит как от свойств КПС, так и от свойств связующего, то для определения гидравлических характеристик КПС армирующей компоненты ПКМ в процессе импрегнирования, независимо от индивидуальных свойств связующего, целесообразно использовать понятие проницаемости КПС армирующей компоненты ПКМ. Количественно этот показатель выражается посредством коэффициента проницаемости K_n , характеризующим только свойства КПС и связанным с коэффициентом фильтрации зависимостью:

$$K_n = \frac{K_{\phi} \mu}{\rho g}, \quad (3)$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, $\text{м}/\text{с}$; ρ – плотность связующего, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; μ – динамическая вязкость связующего, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

В свою очередь, для ламинарного потока зависимость между коэффициентом фильтрации K_{ϕ} и пористостью КПС (рис. 1 – зависимость коэффициента фильтрации в функции показателя Козени-Кармана (коэффициенты фильтрации: k_{fx} – хлопчатобумажной ткани, соответствующий динамической (эффективной) пористости 200 мкм; k_{fx1} – льняной ткани, соответствующий динамической (эффективной) пористости 280 мкм); k_{fx2} – углеродной ткани полотняного переплетения, соответствующий динамической (эффективной) пористости 250 мкм)) может быть определена посредством параметра Козени-Кармана [4]:

$$K_{\phi} = \frac{d_f^2}{c} \frac{\varepsilon_f^3}{(1-\varepsilon_f)^2}, \quad (4)$$

где d_f – средний диаметр волокон, мм ; ε_f – эффективная пористость КПС армирующей компоненты, c – параметр Козени-Кармана, зависящий от извитости пор (для волокнистых материалов $80 \leq c \leq 320$).

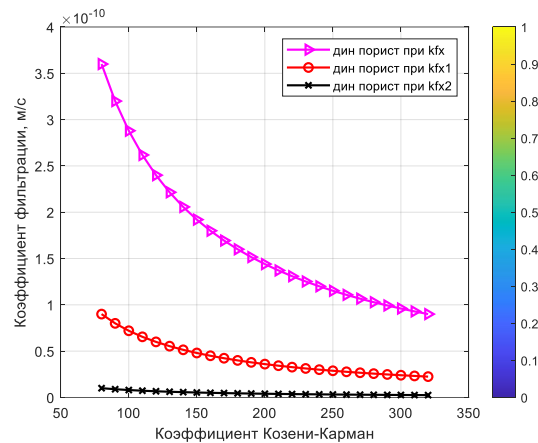


Рис. 1

Эффективная пористость армирующего материала определяется как дробный объем пор, сопоставимый по размеру с критическим диаметром молекул связующего. При этом пористость волокнистого армирующего наполнителя поддается варьированию как по величине общего объема пор, так и по изменению эффективного диаметра пор [5].

При этом, решая задачу синтеза функциональных параметров (геометрических и гидравлических) КПС ПКМ применительно к реализации процесса импрегнирования, предшествующие соображения дают возможность представить уравнение Дарси (2) посредством коэффициента проницаемости:

$$Q = K_n S \left(\frac{P_f}{\mu H} \right), \quad (5)$$

где P_f – величина гидравлического вакуума – источника движущих сил процесса импрегнирования, Па .

Для КПС армирующей компоненты ПКМ, имеющих поры в виде параллельного

пучка капилляров с диаметрами одного порядка, коэффициент проницаемости K_{Π} может быть определен как

$$K_{\Pi} = \frac{\pi d_K^4}{128} n, \quad (6)$$

где d_K – диаметр капилляра, м; n – количество пор на единицу поверхности КПС, m^{-2} .

При использовании коэффициента проницаемости в критериях, характеризующих процесс течения связующего через КПС армирующей компоненты, имеет место линейная зависимость между этими критериями в соответствии с гипотезой Козени-Кармана. Однако отклонение от линейности закона процесса импрегнирования может наступить при различных пороговых значениях, определяемых критерием Рейнольдса для различных параметров функционирования (гидродинамических параметров) КПС ПКМ.

Это может быть объяснено наличием в поровых каналах местных сопротивлений, вследствие чего многоструйный поток жидкости движется через пористую структуру по криволинейным траекториям с непрерывно изменяющимися скоростями и ускорениями, причем в один и тот же момент времени в различных поровых каналах одной фильтрующей КПС эти показатели могут существенно различаться, следствием чего является нарушение устойчивости гидродинамических параметров потока связующей компоненты через КПС ПКМ.

Прогнозируя геометрические параметры КПС, задавшись значениями d_K , n и имея в виду, что средняя скорость импрегнирования – заполнения пор КПС – $v_{\phi} = Q/S$, получим графическую зависимость скорости импрегнирования от коэффициента фильтрации для различных значений коэффициента динамической вязкости связующего (рис. 2 – скорость импрегнирования в функции коэффициента фильтрации применительно к различным значениям динамической вязкости связующего ($\mu_1=1,5$ Па·с (ПВС марки 10/2); $\mu_2=6,0$ Па·с (ПВС марки 27/1) – для коллоидных композиций поливинилового спирта при

12%-ной концентрации матрицы; $\mu_1=3,5$ Па·с – для коллоидной композиции акрилатного полимера (оксилат жирных кислот – TUBIVIS DRL 170)).

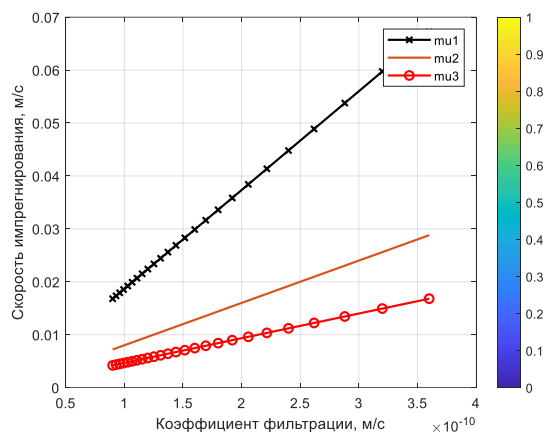


Рис. 2

Полученные графические зависимости дают возможность определить местные значения скорости импрегнирования в КПС ПКМ (как перегородку) с расчетом значения пропускной способности КПС по заданным величинам гидравлического вакуума. Зависимость среднего значения пропускной способности КПС от заданной величины вакуума показана на рис. 3 – скорость импрегнирования в функции коэффициента фильтрации применительно к различным значениям создаваемого вакуума: $dP=0,2E6$ Па – методом контактной формовки; $dP1=50E6$ Па – методом прессования (давление впрыска); $dP2=0,1E6$ Па – методом вакуумной инфузии.

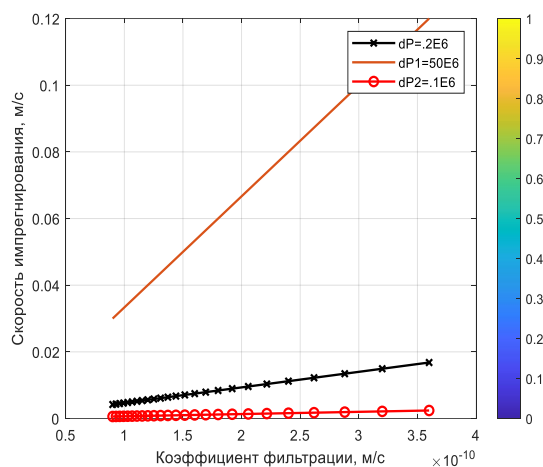


Рис. 3

Так как большинство КПС армирующей компоненты ПКМ имеет поры неправильной формы и переменного сечения, расположенные произвольно по пути движения связующего, то реальное значение коэффициента проницаемости K_p этих материалов возможно определить только экспериментально или прогнозировать методами синтеза и анализа стохастических моделей.

Одним из направлений повышения производительности процесса импрегнирования капиллярно-пористой структуры нами рассматривается возможность сообщения системе ультразвуковых колебаний [10], [11], создающих при динамическом режиме знакопеременное давление P_w , носящее волновой характер, вследствие чего выражение, определяющее скорость импрегнирования, имеет вид [5]:

$$V_{\phi} = \frac{K_{\phi} D_p + P_w}{\mu} \cdot \frac{1}{1} \quad (7)$$

Таким образом, при динамическом режиме скорость V_{ϕ} движения частиц связующего через КПС имеет большую величину, чем при статическом режиме нагружения за счет дополнительного знакопеременного давления ΔP . Подключая в численную модель [6] дополнительные параметры устройства, генерирующего динамический режим процесса импрегнирования, мы получили зависимости скорости движения связующего в КПС для различных значений частот генерирования динамического режима процесса импрегнирования в форме ультразвуковых колебаний (рис. 4 – зависимости скорости импрегнирования связующего через КПС от коэффициента фильтрации в статическом и динамическом режимах при заданных частотах колебаний ультразвукового генератора: dyn – 50000 кГц; dyn1 – 42000 кГц; dyn2 – 35000 кГц).

При достаточно малой скорости движения связующего через КПС основную часть гидравлических потерь составляют потери на трение, а на долю потерь в местных сопротивлениях приходится сравнительно небольшая величина. Режим движения связующего в порах при этом будет носить ламинарный характер, а потери на трение бу-

дут связаны со скоростью потока посредством линейной зависимости в соответствии с уравнением Дарси (4).

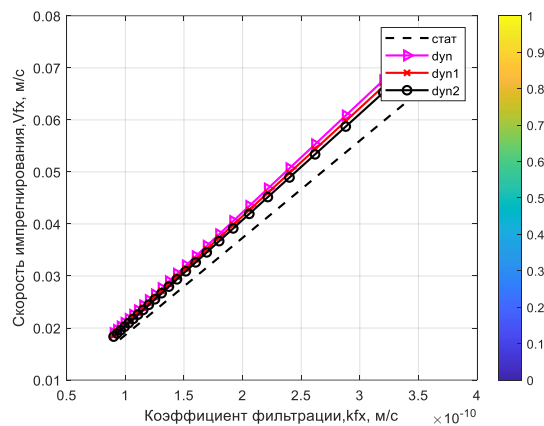


Рис. 4

Увеличение производительности процесса импрегнирования за счет повышения скорости течения гидродинамический режим движения потока будет отклоняться от ламинарного, что связано с возрастанием относительного влияния гидравлических потерь в местных сопротивлениях на суммарные потери в КПС армирующей компоненты ПКМ, причем течение жидкости не будет подчиняться зависимостям, соответствующим уравнению (5).

Для определения оптимальной скорости течения связующего через КПС армирующей компоненты ПКМ необходимо иметь показатель, выраженный в критериальной форме, так как сложность происходящих при этом явлений и многообразие различных факторов, влияющих на рассматриваемый процесс, не позволяют решать описывающие его уравнения в аналитическом виде.

Движение связующего через КПС армирующей компоненты ПКМ помимо критерия Рейнольдса (Re), как меры отношения инерционных сил и сил трения в КПС [3], будет определяться также критерием Эйлера, характеризующим зависимость скорости импрегнирования от полного перепада давлений в КПС армирующей компоненты ПКМ и являющегося мерой отношения сил гидравлического давления и сил инерции в потоке связующего:

$$Re = \frac{v_{\phi} \rho \sqrt{K_{\Pi}}}{\mu}$$

$$Eu = \frac{\Delta p \sqrt{K_{\Pi}}}{H v_{\phi}^2 \rho} \quad (8)$$

Поскольку движущая сила в процессе импрегнирования определяется глубиной гидравлического вакуума, создаваемого в КПС армирующей компоненты ПКМ по пути движения связующего, то применяется модифицированный критерий Эйлера, в котором показатель средней скорости импрегнирования выражен в виде численно равного ему показателя удельной пропускной способности КПС армирующей компоненты ПКМ при заданной величине вакуума [9], характеризующего для несжимаемой жидкости с постоянными физическими параметрами отношение сил давления и сил инерции с позиций величины не абсолютного давления, а его изменения.

Для характеристики влияния толщины слоя КПС армирующей компоненты ПКМ на процесс импрегнирования КПС критерий Эйлера (Eu) целесообразно преобразовать, заменив показатель перепада давления – гидравлического вакуума, величиной градиента давления $\Delta p/H$ [3].

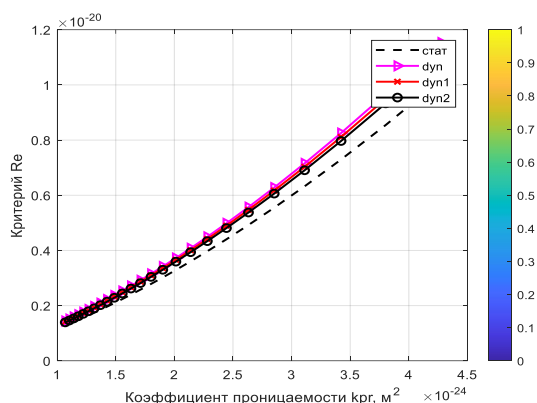


Рис. 5

Экспериментальное определение параметра, определяющего геометрические характеристики КПС армирующей компоненты ПКМ – коэффициентом проницаемости K_{Π} , величина которого зависит только от геометрических параметров КПС армирующей компоненты ПКМ [3], дает возможность выразить модифицированный критерий Эйлера в виде:

Зависимости изменяющихся критериев Re и Eu от величины гидравлического вакуума в виде градиента давления $\Delta p/H$ применительно к условиям движения фильтруемой связующей через проницаемую КПС в условиях статического режима движения и режима интенсифицированного ультразвуковыми колебаниями, сообщенными вязкой связующей, показаны на рис. 5 (значения критерия Рейнольдса Re в зависимости от коэффициента проницаемости КПС при статическом и динамическом режимах при динамической вязкости связующего ($\mu=1,5$ Па·с (ПВС марки 10/2) – для коллоидной композиции поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы) и рис. 6 (характер изменения критериев Эйлера (а) и Лагранжа (б) в зависимости от коэффициента проницаемости КПС при статическом и динамическом режимах импрегнирования для динамической вязкости связующей ($\mu=1,5$ Па·с (ПВС марки 10/2) – для коллоидной композиции поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы).

Критерий Эйлера будет в случае ламинарного режима течения иметь очень большие значения, так как силы давления во много раз превышают величину инерционных сил, а величина критерия Рейнольдса будет крайне мала ввиду преобладающего влияния сил трения (рис.6-а), то есть

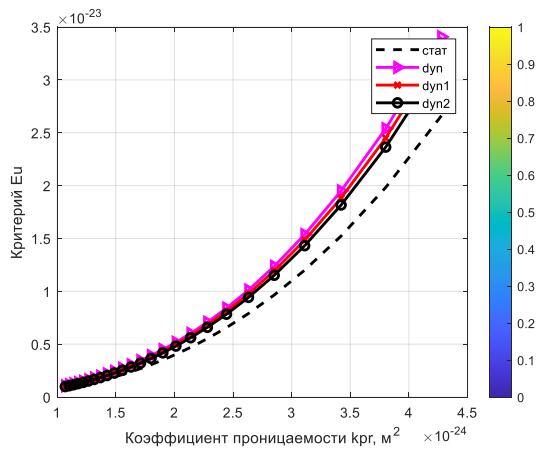
$$Re \rightarrow 0; Eu \rightarrow \infty,$$

а в качестве критерия подобия может быть использован критерий Лагранжа (La), определяемый как произведение вырождающихся критериев Рейнольдса (Re) и Эйлера (Eu) [9]

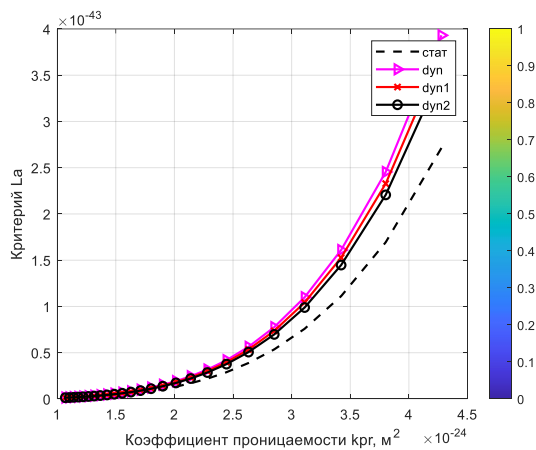
$$La = Re Eu = \frac{\Delta p K_{\Pi}}{v_{\phi} \mu H}$$

Постоянство критерия Лагранжа при заданных технологических параметрах про-

цесса импрегнирования в условиях ламинарного режима свидетельствует об автономности процессов перемещения связующего через КПС ПКМ, то есть об их автоматическом подоби (рис. 6-б).



(а)



(б)

Рис. 6

Подобие процесса импрегнирования при ламинарном режиме в случае выбора в качестве геометрического параметра, входящего в критерии подобия, коэффициента проницаемости K_{II} является неполным, так как в этом случае граничные значения применимости линейного закона фильтрования зависят от частных значений свойств фильтрующей способности структурных параметров армирующей КПС ПКМ.

Изложенное справедливо для движения связующего через КПС армирующей компоненты ПКМ, то есть для процесса импрегнирования КПС ПКМ.

Поскольку в реальных условиях в связующем, хотя и содержатся твердые частицы, но накопления этих частиц в порах фильтрующей перегородки и на ее поверхности не приводит к изменению пористости КПС армирующей компоненты ПКМ ввиду систематического обновления КПС армирующей компоненты ПКМ и тем самым к изменению режима течения жидкой связующей через КПС ПКМ.

Трансфер связующего через КПС ПКМ, как фильтрующую перегородку, реализуется при заданных параметрах: при постоянных значениях гидравлического вакуума и скоростях импрегнирования, определяющих задаваемые значения параметров технологического процесса (рис. 2, 3).

Критериальная форма зависимостей, характеризующих процесс импрегнирования как частного случая процесса фильтрования связующего через КПС ПКМ в условиях гидравлического вакуума при изменении скорости течения, характеризуется критерием гомохронности [8]:

$$No = \frac{v_{\phi} \tau}{\sqrt{K_{II}}},$$

где τ – длительность процесса импрегнирования (заполнения КПС ПКМ), с.

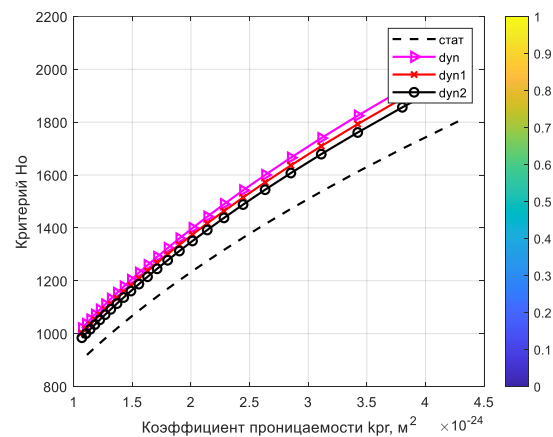


Рис. 7

Значения критерия No , характеризующие изменимость средней скорости заполнения КПС ПКМ при заданной величине гидравлического вакуума и в условиях ста-

тического и динамического режимов нагружения системы, приведены на рис. 7 (характер изменения критерия гомохронности – Но, в зависимости от коэффициента проницаемости КПС при статическом и динамическом режимах по значениям динамической вязкости связующей ($\mu=1,5$ Па·с (ПВС марки 10/2) – для коллоидной композиции поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы).

Так как движущей силой процесса импрегнирования является перепад давлений на пористой перегородке, то очевидно, что процесс фильтрования определяется зависимостью вида [9]:

$$Eu = f(No),$$

где в модифицированном критерии Эйлера показатель средней скорости фильтрации заменен численно равным ему показателем удельной пропускной способности пористой перегородки при соответствующем перепаде давления (6).

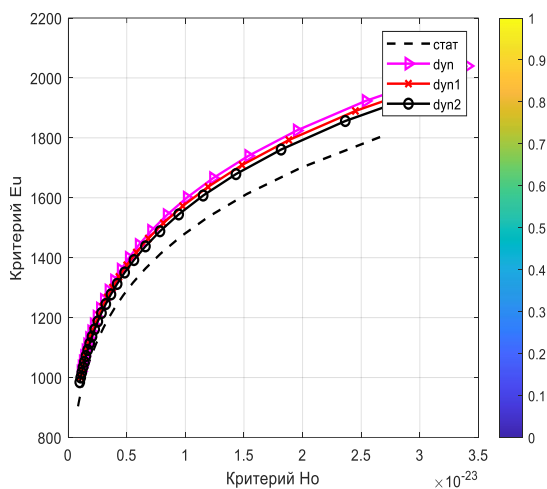


Рис. 8

Применительно к процессу импрегнирования с самоочищающейся структурой КПКМ эта зависимость получена нами и представлена на рис. 8 (зависимость модифицированного критерия Эйлера в функции критерия гомохронности Но – при статическом и динамическом режимах с динамической вязкостью связующего ПВС марки 10/2 $\mu=1,5$ Па·с – для коллоидной композиции поливинилового спирта при

12%-ной концентрации матрицы).

Она позволяет установить значения кинетических параметров процесса импрегнирования, которые необходимы для его реализации по заданным структурным параметрам КПС ПКМ.

Процессы адсорбции вязкой связующей текстильным армирующим очень чувствительны к линейному размеру пор. Если размеры микропор соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул, то адсорбция протекает не послойным заполнением поверхности молекулами, а по механизму объемного заполнения [4].

Решение обратной задачи, ориентированной на синтез полимерной волокнистой пористой армирующей структуры – как фильтрующей перегородки, дает возможность определить усредненные значения диаметра капилляра и их количество на единицу площади пористой структуры.

Входными параметрами синтеза являются заданные пропускная способность КПС ПКМ, величина гидравлического вакуума системы, геометрические характеристики, физико-механические свойства фильтруемой жидкости – связующего.

Приведенные графические зависимости дают возможность синтеза КПС армирующей компоненты ПКМ с переменной плотностью пористой структуры по пути движения связующего, обеспечивающей заданные значения коэффициента проницаемости K_p в соответствии с визуализированными результатами вычислительного эксперимента, представленными на рис. 5...7.

ВЫВОДЫ

Результаты численного моделирования влияния динамического воздействия на кинетику процесса импрегнирования армирующей капиллярно-пористой структуры вязким связующим дают возможность прогнозирования задаваемых структурных параметров синтезируемого композитного материала, а также предпосылки к прототипированию технологического оборудования для реализации исследуемого процесса при оптимальных технико-экономических показателях.

Получены графические зависимости кинетических показателей импрегирования связующего в капиллярно-пористой структуре при различных значениях генерируемых частот динамического воздействия в форме ультразвуковых колебаний для различных коллоидных композиций связующего, динамической пористости армирующей компоненты, с величинами перепада давления на единичной длине диффузии применительно к методам получения полимерного композитного материала.

Приведенные результаты компьютерного анализа результатов численного моделирования кинетики процесса импрегирования связующего с учетом транзитного расхода при движении связующего через пористую структуру с учетом значений критерия гомохронности, характеризующего гидродинамические условия в нестационарных режимах ламинарного потока связующего, дают возможность системного подхода в решении задачи анализа технологических параметров процесса импрегирования капиллярно-пористой структуры армирующей компоненты полимерного композитного материала вязкой связующей, а также реализовать технологию синтеза аппаратного обеспечения системы по заданным конструкционным характеристикам на основе методов компьютерного объектно-ориентированного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мизонов В.Е. Моделирование, расчет и оптимизация теплообменных процессов в текстильной промышленности. – Иваново, 2010. ISBN 978-5-9616-0350-7.
2. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Синтез ячеечной модели массообмена в процессе обезвоживания волокнистого материала распределенным давлением // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №6. С. 118...121.
3. Фандеев В.П., Самохина К.С. Методы исследования пористых структур. – режим доступа <https://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf/>
4. Schiavi A., Shtrepi L., Corona D. Effective scale of microstructure of fibrous permeable materials. – ICSV25, Hiroshima, 8-12 July 2018.
5. Ershov S., Kalinin E., Kuznetsov V., Koksharov S.A. and Baranov A. Numerical Model of the Mass Transfer Transition States in the Vacuum Infusion Process of the Polymer Matrix and the Reinforcing

Filler Structure // XVI international scientific and practical conference "new polymeric composite materials, Микитаевские чтения, НПКМ-2020. – РФ, Нальчик, 2020.

6. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Метод ячеечного моделирования как инструмент численного анализа массообмена при отжиге текстильного материала в валковой паре // Сб. мат. Всерос. научн.-технич. конф.: Современные тенденции развития информационных технологий в текстильной науке и практике. – Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2012. С. 14...18.

7. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Использование механических колебаний как фактора интенсификации массообменных процессов в технологии обработки капиллярно-пористых структур // Сб. мат. Всерос. научн.-техн. конф.: Динамика машин и рабочих процессов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. С. 96...98.

8. Olyak M.R. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – Vol. 102, 2013. P. 185...191.

9. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов теплообмена. – М.: Высшая школа, 2018.

10. Cell modeling of mass transfer in a dewatering process of fiber by distributed pressure. S. Ershov, E. Kalinin. Technical Transactions 5/2017 Mechanics year. 2017 (114), Cracow University of technology, (Chemical Abstracts) P.123...128.

11. Пат. №2435992 Российская Федерация, МПК F15B 21/12, B06B 1/18. Устройство для создания импульсного режима нагружения исполнительных органов технологических машин. 19.04.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. №34.

REFERENCES

1. Mizonov V.E. Modeling, calculation and optimization of heat and mass transfer processes in the textile industry. – Ivanovo, 2010. ISBN 978-5-9616-0350-7.
2. Ershov S.V., Kalinin E.N. Synthesis of a cell model of mass transfer in the process of dehydration of a fibrous material by distributed pressure. Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2011, No. 6. pp. 118...121.
3. Fandeev V.P., Samokhina K.S. Methods for studying porous structures. – access mode <https://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf/>
4. Schiavi A., Shtrepi L., Corona D. Effective scale of microstructure of fibrous permeable materials. – ICSV25, Hiroshima, 8-12 July 2018.
5. Ershov S., Kalinin E., Kuznetsov V., Koksharov S.A. and Baranov A. Numerical Model of the Mass Transfer Transition States in the Vacuum Infusion Process of the Polymer Matrix and the Reinforcing Filler Structure // XVI international scientific and practical conference "new polymeric composite materials, Mikitaev Readings, NPKM-2020. – RF, Nalchik, 2020.

6. Ershov S.V., Kalinin E.N. The method of cell modeling as a tool for numerical analysis of mass transfer during the extraction of textile material in a roll pair // Sat. mat. Vseros. scientific and technical Conf.: Modern trends in the development of information technology in textile science and practice. - Dimitrovgrad: DITI NRNU MEPhI, 2012. S. 14 ... 18.

7. Ershov S.V., Kalinin E.N. The use of mechanical vibrations as a factor in the intensification of mass transfer processes in the technology of processing capillary-porous structures // Sat. mat. Vseros. scientific-technical Conf.: Dynamics of machines and working processes.- Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU, 2012. P. 96...98.

8. Olyak M.R. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – Vol. 102, 2013. P. 185...191.

9. Gukhman A.A. Application of the theory of similarity to the study of heat and mass transfer processes. – M.: Higher school, 2018.

10. Cell modeling of mass transfer in a dewatering process of fiber by distributed pressure. S. Ershov, E. Kalinin. Technical Transactions 5/2017 Mechanics year. 2017 (114), Cracow University of technology, (Chemical Abstracts) P.123...128.

11. Pat. No. 2435992 Russian Federation, IPC F15B 21/12, B06B 1/18. A device for creating a pulsed loading mode for the executive bodies of technological machines. 04/19/2010; publ. 10.12.2011, Bull. No. 34.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 07.12.21.
