

Течение вязкоупругой жидкости через пористый наполнитель при формировании композитных изделий в закрытых формах

Viscoelastic fluid flow through a porous filler during molding of composite products in closed molds

A.B. БАРАНОВ, С.А. ЮНИЦКИЙ

A.V. BARANOV, S.A. YUNITSKY

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва

National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow

alexvbaranov@yahoo.co.uk

Исследуется течение и теплообмен при пропитке наполнителя неньютоновской жидкостью в процессе формирования композитных изделий в закрытых формах. Течение описывается уравнением Бринкмана. С реологической точки зрения среда представляет собой вязкоупругую жидкость Фан-Тьен-Таннера. Задача решена численным методом конечных разностей.

Ключевые слова: неньютоновская жидкость, пропитка, формирование

The flow and heat transfer during impregnation of the filler with a non-Newtonian liquid in the process of forming composite products in closed forms is investigated. The flow is described by the Brinkman equation. In terms of rheology, medium is the Phan-Thien-Tanner fluid. The problem is solved by a numerical method of finite differences.

Keywords: non-Newtonian fluid, impregnation, molding

DOI: 10.35164/0554-2901-2020-1-2-17-18

Рассматривается процесс литьевого или трансферного формирования армированных или композитных изделий в закрытых формах. Жидкость в режиме постоянного расхода нагнетается в форму, заполненную пористым материалом-наполнителем (рис. 1). После завершения процесса заполнения формы и пропитки всего пористого слоя происходит затвердевание отливки в результате процессов кристаллизации или стеклования при охлаждении полимеров, желатинизации пластизолов или химического отверждения полимерного связующего (например, эпоксидные и полиэфирные смолы). В данной работе предполагается, что процессы формирования и пропитки завершаются в пределах так называемого индукционного периода, т.е. до наступления преждевременной желатинизации или отверждения.

В литературе достаточно большое количество работ посвящено моделированию процессов течения и теплообмена различных сред в пористых материалах. Обзор некоторых работ на данную тему, появившихся в литературе до 2011 года, приведен в [1]. Из публикаций, появившихся за последние годы, можно отметить [2], где численно и экспериментально моделируется процесс трансферного формирования, когда реакционноспособная смола впрыскивается в закрытую форму, предварительно заполненную пористым наполнителем. Используется степенная реологическая модель (псевдопластик). Расчет течения и теплообмена с учетом протекания химической реакции отверждения проводится на основе одного уравнения энергии в предположении локального термического равновесия между смолой и пористым материалом. Сравнение численных и экспериментальных данных по распределению температуры показало важность учета диссипативного члена в уравнении энергии.

Если брать во внимание работы, непосредственно посвященные технологическому процессу формирования композитных изделий в закрытых формах, то кроме работы [2] можно привести публикации [3–5]. В этих работах нагнетаемая в форму жидкость описывалась степенной реологической моделью. При этом в [4], так же как и в [2], жидкость считалась реакционноспособной.

При моделировании течения неньютоновской жидкости через пористые материалы может использоваться не только реологичес-

кая модель степенной жидкости. Представляет значительный интерес рассмотреть жидкости, проявляющие вязкоупругие свойства. Это свойственно большинству полимерных систем. Поэтому в данной работе используется реологическая модель вязкоупругой жидкости. Рассматривается процесс заполнения плоской закрытой формы, предварительно заполненной пористым материалом (рис. 1).

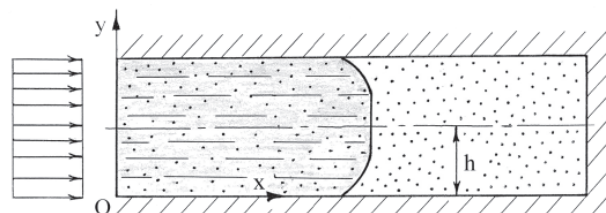


Рис. 1. Схема процесса формирования.

Полимер считается несжимаемой неньютоновской вязкоупругой жидкостью, описываемой моделью Фан-Тьен-Таннера, упрощенная форма которой может быть записана в следующем виде [7]:

$$f(tr\tau)\tau + \lambda \left(\frac{\partial \tau}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \tau - \tau \cdot \nabla \vec{V}^T - \nabla \vec{V} \cdot \tau \right) = \mu (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) \quad (1)$$

где τ – экстра-тензор напряжений, $f(tr\tau)$ – функция первого инварианта (так называемого следа) экстра-тензора напряжений, λ – время релаксации, $\vec{V}$ – вектор скорости, μ – вязкость. Известно, например, [6], что для большинства эластомеров при малых скоростях деформации порядка $10^{-2} - 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ напряжение сдвига пропорционально скорости сдвига. При этом вязкость μ для основных каучуков находится в интервале 1–10 МПа·с.

Функция $f(tr\tau)$ может быть записана как в экспоненциальном, так и в линейном виде [7]. В данной работе для упрощения выкладок примем линейную форму зависимости:

$$f(tr\tau) = 1 + \frac{\varepsilon \lambda}{\mu} tr\tau \quad (2)$$

Где ε – реологическая константа, обратно пропорциональная продольной вязкости. Так, для некоторых марок резиновых смесей на основе различных каучуков экспериментально определено, что $\varepsilon = 1$ и $\lambda \approx 0,05 \text{ с}$ [8].

Вязкость жидкости считается достаточно высокой, так что течение осуществляется при низких значениях критерия Рейнольдса ($Re \leq 0,01$). В результате гидродинамический начальный участок практически отсутствует, и профиль скорости на входе в канал можно считать развитым [9, 10]. Кроме этого, в уравнении движения это позволяет пренебречь инерционными членами, поэтому пропитку пористого слоя будем описывать с помощью уравнения Бринкмана [1]:

$$-\frac{\mu}{k} v_x + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

где v_x – осевая скорость фильтрации; μ – вязкость жидкости; k – коэффициент проницаемости; p – давление, τ_{xy} – напряжение сдвига.

Для упрощения задачи в дальнейшем предполагалось, что в уравнении Бринкмана вязкость жидкости и эффективная вязкость совпадают. Давление p считается независимым от поперечной координаты y . При этом реологические уравнения записываются в виде следующей системы [7]:

$$f(\tau_{xx}) \tau_{xx} = 2\lambda \tau_{xy} \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (4)$$

$$f(\tau_{xx}) \tau_{xy} = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) записаны в предположении $\tau_{yy} = 0$. Если поделить (4) на (5), то получим:

$$\tau_{xx} = \frac{2\lambda}{\mu} \tau_{xy}^2 \quad (6)$$

где τ_{xx} – продольная растягивающая компонента напряжений.

Таким образом, система реологических уравнений, записанных в безразмерном виде, представляется следующим образом:

$$\sigma_{xx} = 2Wi \sigma_{xy}^2 \quad (7)$$

$$f(\sigma_{xx}) \sigma_{xy} = \frac{\partial V_x}{\partial Y} \quad (8)$$

где

$$f(\sigma_{xx}) = 1 + \varepsilon Wi \sigma_{xx} \quad (9)$$

$$Y = y/h, \quad V_x = v_x / \bar{v}_x, \quad \sigma_{xy} = \frac{\tau_{xy} h}{\mu \bar{v}_x}, \quad Wi = \frac{\lambda \bar{v}_x}{h}$$

Wi – число Вайсенберга, $\bar{v}_x$ – средняя скорость потока, h – полувысота плоской полости (см. рис. 1).

Соответственно, уравнение Бринкмана в безразмерном виде запишется:

$$-\frac{V_x}{Da} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial Y} = \frac{dP}{dX} \quad (10)$$

где

$$P = \frac{ph}{\mu \bar{v}_x}, \quad V_x = \frac{v_x}{\bar{v}_x}, \quad X = \frac{x}{h}, \quad Da = \frac{k}{h^2} - \text{число Дарси}.$$

Условие постоянства расхода:

$$\int_0^1 V_x dY = 1 \quad (11)$$

Граничные условия записываются следующим образом:

$$Y = 0 \quad V_x = 0, \quad (12)$$

$$Y = 1 \quad \frac{\partial V_x}{\partial Y} = 0 \quad (13)$$

Подстановка (7) в (9) дает:

$$f(\sigma_{xx}) = 1 + 2\varepsilon Wi^2 \sigma_{xy}^2 \quad (14)$$

В свою очередь, после подстановки (14) в (8) получим:

$$\frac{\partial V_x}{\partial Y} = \sigma_{xy} + 2\varepsilon Wi^2 \sigma_{xy}^3 \quad (15)$$

Система уравнений (10), (11) и (15) решалась численно методом конечных разностей с использованием итераций.

На рис. 2 показано влияние числа Дарси на профиль скорости при фиксированном значении параметра вязкоупругости $\varepsilon Wi^2 = 0,01$. Видно, что с уменьшением числа Дарси профиль скорости становится более плоским.

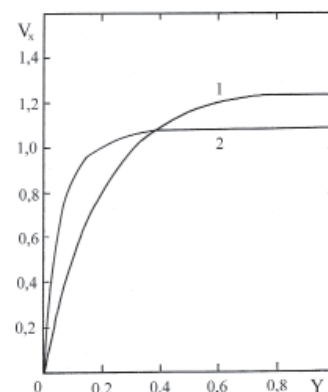


Рис. 2. Влияние числа Дарси на профиль скорости.

$\varepsilon Wi^2 = 0,01$.

1. $Da = 0,1$; 2. $Da = 0,01$.

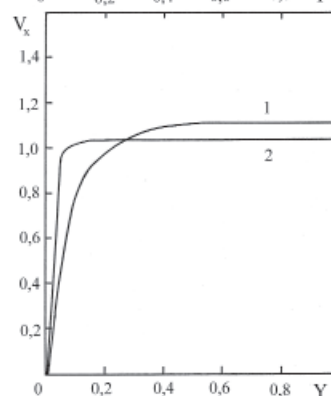


Рис. 3. Влияние параметра вязкоупругости εWi^2 на профиль скорости.

$Da = 0,05$.

1. $\varepsilon Wi^2 = 0,1$; 2. $\varepsilon Wi^2 = 1,0$.

В свою очередь, из рис. 3 вытекает, что увеличение параметра вязкоупругости εWi^2 при фиксированном значении числа Дарси также приводит к тому, что профиль скорости становится более плоским. Расчеты показывают, что при выполнении условий $Da \leq 10^{-4}$ и (или) $\varepsilon Wi^2 > 20$ профиль скорости становится настолько наполненным, что практически это приводит к пробковому режиму течения. При таких условиях систему (10), (11), (15) можно не решать и с достаточной для инженерных расчетов степенью точности принять абсолютно плоский профиль скорости по всей длине потока.

Литература

1. Баранов А.В. Неизотермическое диссипативное течение вязкой жидкости в пористом канале // Теплофизика высоких температур, 2017, Т. 55, № 3, С. 433–439.
2. Shahnazari M.R., Nejad A. Abbas. Numerical and experimental evaluation of dispersion coefficient for resin transfer modeling // Transp. Porous Media, 2012, V. 91, № 2, P. 605–625.
3. Баранов А.В., Дахин О.Х. Совмещенные процессы течения и пропитки при литьевом формировании композитных изделий // Пластические массы, 2015, № 3–4, с. 23–26.
4. Баранов А.В. Течение с пропиткой химически реагирующей жидкости при формировании композитных изделий // Пластические массы, 2015, № 11–12, С. 20–23.
5. Баранов А.В., Юницкий С.А. Формование композитных изделий в закрытых формах // Механика композиционных материалов и конструкций, 2016, Т. 22, № 1, С. 54–59.
6. Баранов А.В. Неизотермическое течение вязкоупругих эластомерных композиций в сходящемся канале // Каучук и резина, 2016, № 4, С. 34–37.
7. Ferras Luis L., Nobrega Joao M., Pinho Fernando T. Analytical solutions for channels flows of Phan-Thien-Tanner and Giesekus fluids slip // J. Non-Newton. Fluid Mech., 2012, V. 171–172, P. 97–105.
8. Вачагина Е.К., Кайдыров А.И., Кайнова А.А., Халитова Г.Р. Течение вязкоупругой жидкости в призматическом канале квадратного поперечного сечения на примере резиновых смесей // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2016, №1, С. 9–17.
9. Тябин Н.В., Дахин О.Х., Баранов А.В. Влияние температуры и давления на течение реологически сложных сред в плоском канале // Теплофизика высоких температур. 1982, т. 20, № 1, С. 81.
10. Малкин А.Я., Баранов А.В., Тябин Н.В. Течение отверждаемой неньютоновской жидкости в канале при наличии пристенного скольжения // Теоретические основы химической технологии. 1991, т.25, № 1, С. 72.