ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЛИВА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ КОНУСООБРАЗНОЙ ВОРОНКИ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ ПРЯМОУГОЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Е.И. Борзенко, Е.И. Хегай, Г.Р. Шрагер

Томский государственный университет
634050, Томск, Россия

Технология переработки полимерных материалов методом литья включает слив полимерной композиции из смесителя с одновременным заполнением пресс-формы как одну из стадий процесса [1]. Характерной особенностью течения, реализуемого в процессе слива и заполнения, является наличие свободных поверхностей в сливной и заполняемой ёмкостях.

На определенном этапе слива фронт свободной поверхности деформируется с образованием воронки и последующим прорывом газа в сливное отверстие. Проникновение газа в заполняемую ёмкость приводит к образованию дефектов в монолитности формуемого изделия. Поэтому возникает необходимость контроля момента времени достижения плоскости сливного отверстия фронтом свободной поверхности. Кроме того правильная организация процесса формования изделия требует изучения процесса заполнения ёмкости сливаемой жидкостью.

Рассматриваемое течение вязкой жидкости, реализуемое при сливе из конусообразной ёмкости с одновременным заполнением прямоугольной полости в плоском приближении, описывается уравнениями Навье-Стокса и неразрывности, которые в безразмерных переменных в декартовой системе координат записываются в виде

$$\mathrm{Ga}\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right), \quad (1)$$

$$\mathrm{Ga}\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+1, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0. \quad (3)$$

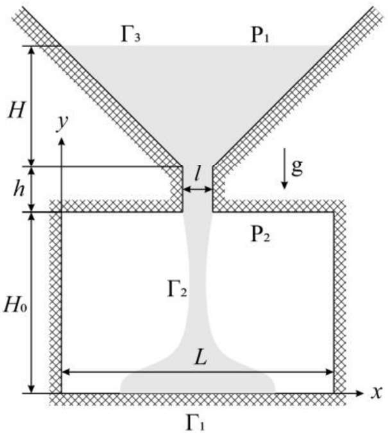

Рис. 1. Область решения.

© Е.И. Борзенко, Е.И. Хегай, Г.Р. Шрагер, 2019

Здесь u, v – проекции вектора скорости на оси декартовой системы координат x, y, t – время, p – давление.

Область решения схематично представлена на рис. 1.

В качестве масштабов длины, скорости, времени и давления используются следующие величины: l – ширина сливного насадка, комплексы $\rho g l^2/\mu$, $\mu/\rho g l$ и $\rho g l$ соответственно. В постановку входят безразмерные параметры: число Галилея Ga; избыточное давление на свободной поверхности в сливной ёмкости P и геометрические характеристики. Число Галилея и избыточное давление определяются формулами

$$\mathrm{Ga} = \frac{g\rho^2 l^3}{\mu^2},\ \ \mathrm{P} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g l}.$$

Здесь μ – вязкость жидкости, ρ – плотность, g – ускорении силы тяжести.

На твердых стенках Γ_1 выполняются условия прилипания. На свободных поверхностях Γ_2 и Γ_3 выполняются условия непрерывности нормальных и касательных напряжений.

В начальный момент времени жидкость расположена в сливной ёмкости, при этом свободные границы Γ_2 и Γ_3 являются прямыми $y = H_0$ и $y = (H_0 + h + H)$, соответственно (рис. 1). В момент достижения свободной поверхностью Γ_3 плоскости сливного отверстия $y = (H_0 + h)$ сливная ёмкость вновь считается заполненной жидкостью до уровня $y = (H_0 + h + H)$. Таким образом реализуется непрерывный процесс слива до полного заполнения нижней ёмкости без прорыва газа из сливной ёмкости.

Сформулированная задача решается численно методом VOF [2]. Составляющие вектора скорости рассчитываются с использованием метода контрольного объема, при этом давление вычисляется с помощью процедуры SIMPLE [3]. Движение свободной поверхности реализуется по вычислительной технологии PLIC VOF [4].

Результаты расчетов представлены для следующих размеров: $L = 5$, $H_0 = 8$, $h = 1$, $l = 1$ и $H = 4$ (угол раствора конуса равен 90°). Давление внутри заполняемой полости считалось равным нулю, на свободной поверхности жидкости в сливной ёмкости – принималось равным безразмерному значению избыточного давления P.

В ходе проведения параметрических исследований выявлены различные режимы формирования свободных поверхностей в сливной ёмкости в зависимости от значений определяющих параметров: течение с ранним образованием воронки (рис. 2*a*); слив с сохранением плоской формы свободной поверхности практически до момента достижения сливного отверстия (рис. 2*b*). Картины течения рассматриваются до момента касания верхнего сечения сливного канала свободной поверхностью.

При малых значениях числа Галилея (рисунок 2*a*) реализуется интенсивное течение жидкости вблизи плоскости симметрии, что приводит к быстрому образованию воронки в сливной ёмкости. При больших значениях Ga (рисунок 2*b*) в процессе истечения на твердой стенке формируется тонкий слой жидкости, а часть свободной поверхности вне его движется с сохранением плоской формы.

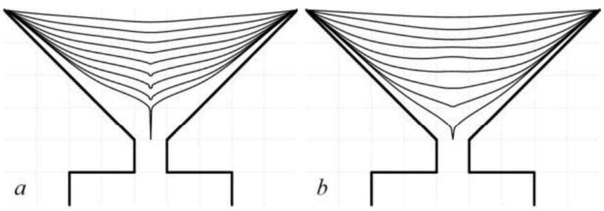

Рис. 2. Эволюция свободной поверхности при P = 0: a – Ga = 1, b – Ga= 100.

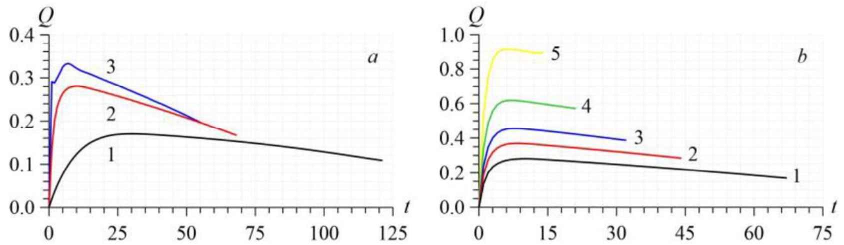

Рис. 3. Объёмный расход жидкости в зависимости от времени до момента прорыва газа:
a – P = 0 (1 – Ga = 100, 2 – Ga = 10, 3 – Ga = 1),
b – Ga = 10 (1 – P = 0, 2 – P = 2, 3 – P = 4, 4 – P = 8, 5 – P = 16).

Зависимость величины безразмерного расхода жидкости через сливной канал от времени показана на рисунке 3*a* для различных чисел Галилея Ga, на рисунке 3*b* – для различных значений избыточного давления P.

Остаток жидкости в сливной ёмкости на момент прорыва газа – один из параметров, характеризующих процесс истечения жидкости. Этот остаток определяется отношением объёмов жидкости в сливной ёмкости в начальный момент времени к объёму жидкости на момент достижения свободной поверхностью Γ_3 плоскости сливного отверстия $y = (H_0 + h)$.

Таблица 1. Остаток жидкости в сливной ёмкости на момент прорыва газа при P = 0, %

Ga	0.1	1	10	100
Остаток жидкости	31	30	26	18

Таблица 1 отражает зависимость объёма жидкости, оставшейся в сливной ёмкости на момент прорыва газа, от значения числа Галилея.

Таблица 2. Остаток жидкости в сливной ёмкости на момент прорыва газа при Ga = 10, %

P	0	2	4	8	16
Остаток жидкости	26	31	36	42	47

В случае, когда в сливной ёмкости реализуется избыточное давление P > 0, наблюдается течение с быстрым образованием воронки, аналогично течению при малых числах Галилея. Подобная тенденция отражается в таблице 2, в которой для различных значений избыточного давления приводится значения остатка жидкости в ёмкости на прорыва газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00412).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **А.В. Новошинцев**, **Г.Р. Шрагер**, **В.А. Якутенок**, **Ю.М. Милехин**, **Ю.Б. Банзула**, **С.В. Карязов** Моделирование процесса истечения вязкой жидкости под действием перепада давления с заполнением канала // Теоретические основы химической технологии. 2009. №3. С. 341-349.
2. **Hirt C.W.**, **Nichols B.D.** Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. No.39. P.201-225.
3. **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и механики жидкости. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
4. **Jang W.**, **Jilesen J.**, **Lien F.S.**, **Ji H.** A study on the extension of a VOF/PLIC based method to a curvilinear coordinate system // International Journal of Computational Fluid Dynamics. 2008. V.22, No.4. - P. 241-257.