

УДК 519.63

Моделирование фильтрации вязкопластической жидкости в пакете ЛОГОС

Мешкова Е.А.¹, Сыромясов А.О.¹

МГУ им. Н.П. Огарёва¹

Аннотация: В работе представлены результаты численного исследования фильтрации вязкопластических жидкостей через регулярные пористые среды на примере гексагональной плотноупакованной структуры в пакете ЛОГОС. Ввиду отсутствия встроенной реологической модели Бингама в гидродинамическом модуле пакета, расчеты выполнены с использованием адаптированного модуля «Логос Прочность» на основе упругопластической модели с учетом вязкости. Проведена двухэтапная верификация решателя на течениях в цилиндрических трубах круглого и прямоугольного поперечного сечения. Установлены закономерности формирования застойных зон и порогового характера течения, оценено влияние реологических параметров жидкости на эффективную проницаемость.

Ключевые слова: численное моделирование, фильтрация, вязкопластическая жидкость, модель Шведова–Бингама, ЛОГОС, предельное напряжение сдвига, пористая среда.

1. Введение

Вязкопластические жидкости, характеризующиеся наличием предельного напряжения сдвига, широко распространены в технологических процессах [1]. Их фильтрация через пористые среды принципиально отличается от классического течения ньютоновских жидкостей, описанных законом Дарси: при градиентах давления ниже порогового значения движение отсутствует, формируются застойные зоны, а эффективная проницаемость зависит от реологических параметров среды [1, 2].

Отечественный пакет программ ЛОГОС представляет собой мощный инструмент для моделирования различных физических процессов [3], однако моделирование течения неньютоновских жидкостей в пористых структурах даже в таких пакетах является достаточно сложным.

Целью работы является численное исследование закономерностей фильтрации вязкопластических жидкостей через регулярные пористые структуры с применением пакета ЛОГОС, а также оценка влияния реологических параметров жидкости на фильтрационные характеристики.

2. Постановка задачи и методика моделирования

Для описания реологического поведения жидкости использовалась модель Шведова – Бингама [1, 4], которая в одномерном сдвиговом течении имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0, & \tau \leq \tau_0, \\ \tau = \tau_0 + \mu_P \dot{\gamma}, & \tau > \tau_0, \end{cases} \quad (1)$$

где τ — касательное напряжение, τ_0 — предельное напряжение сдвига, μ_P — пластическая вязкость, $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига.

Данная модель является частным случаем обобщенной модели Гершеля–Балкли [1], которая задается соотношением:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n, \quad (2)$$

где K — коэффициент консистенции, n — индекс течения.

Так как в расчетах жидкость является несжимаемой, то учитывается уравнение неразрывности, а описание движения основывается на уравнении Навье–Стокса. Однако данная система с реологией Бингама не решается напрямую из-за отсутствия встроенной модели вязкопластической среды в гидродинамическом модуле «Логос Аэро-Гидро». Поэтому для численного моделирования был адаптирован модуль «Логос Прочность» на основе упругопластической модели с учетом вязкости.

Адаптированный подход был применён для моделирования фильтрации через пористую среду, представленную гексагональной плотноупакованной решеткой сферических частиц одинакового диаметра. Эта структура была выбрана из-за ее физической реалистичности и вычислительной эффективности [5]. Использование такой решетки позволило построить трубу (фильтрационную область) со сложной формой внутренней поверхности благодаря контактам сферических гранул.

В качестве граничных условий задавались фиксированные значения давления на входе и выходе трубы, при этом перепад давления известен, а на поверхностях гранул и стенках трубы использовалось условие прилипания.

3. Верификация решателя

Для проверки корректности адаптированного модуля «Логос Прочность» выполнена серия тестовых расчётов. Сначала рассматривалось стационарное течение жидкости плотностью ρ , подчиняющееся модели Шведова–Бингама (1), в бесконечной цилиндрической трубе радиусом R при заданном перепаде давления Δp . Аналитическое решение имеет вид:

$$v(r) = \frac{1}{\mu_P} \left[\frac{|\nabla p|}{4} (R^2 - r^2) - \tau_0 (R - r) \right], \quad r_0 \leq r \leq R, \quad r_0 = \frac{2L\tau_0}{\Delta p}. \quad (3)$$

где L — длина расчетной области.

Расчёт выполнен при $R = 3$ м, $L = 20$ м, $\rho = 1000$ кг/м³, $\mu_P = 1$ Па·с, $\tau_0 = 6$ Па, $\Delta p = 10^5$ Па. Сравнение численных и аналитических значений профиля скорости приведено в таблице 1.

Таблица 1. Профиль скорости в цилиндрической трубе

r , м	Аналитическое решение (3), м/с	ЛОГОС, м/с	Погрешность, %
1.2	8.100	8.091	0.11
2.0	6.500	6.454	0.71
2.5	3.875	3.874	0.03
3.0	0.000	0.000	0.00

Максимальное отклонение не превысило 0.7%, что подтверждает высокую точность реализованного подхода.

Затем для проверки способности модуля моделировать течения в каналах некруглого сечения выполнено сравнение с расчётами в коммерческом пакете ANSYS Fluent [6]. Рассматривался канал с поперечным сечением 8×8 м и длиной $L = 20$ м. В ANSYS использовалась модель Гершеля–Балкли (2) с показателем степени $n = 1$, что эквивалентно модели Бингама с теми же τ_0 и μ_P . Реологические параметры жидкости сохранены такими же, как в предыдущей задаче.

Результаты сравнения с ANSYS представлены в таблице 2.

Таблица 2. Профиль скорости в прямоугольном канале

Расстояние от центра, м	ANSYS, м/с	ЛОГОС, м/с	Погрешность, %
1.4	19.500	19.4627	0.19
2.0	18.000	17.6274	2.07
3.0	11.500	11.4618	0.33
4.0	0.000	0.0000	0.00

Максимальное расхождение составило около 2%, что находится в пределах допустимой погрешности для инженерных расчётов.

Таким образом, модуль «Логос Прочность» корректно воспроизводит вязкопластические течения как в каналах простой, так и сложной геометрии, что позволяет использовать его для моделирования фильтрации в пористых структурах.

4. Результаты моделирования фильтрации в пористой структуре

В ходе вычислительного эксперимента решалась технологическая задача фильтрации бетонной смеси ($\mu_P = 25$ Па·с, $\rho = 2350$ кг/м³, $\tau_0 = 100$ Па) через слой гранулированного керамзита высотой 0.4 м при постоянном перепаде давления.

Таблица 3. Скорость фильтрации в пористой структуре

Расстояние от центра, м	Скорость, м/с
0.05	0.16610
0.10	0.06735
0.15	0.03442
0.20	0.01795
0.25	0.00000

Полученное при моделировании распределение скоростей (таблица 3) позволило количественно описать фильтрацию вязкопластической жидкости внутри регуляр-

ной пористой структуры. Расчеты показывают, что скорость движения жидкости заметно падает при удалении от центра канала: с 0.1661 м/с на расстоянии 0.05 м она снижается до 0.01795 м/с на расстоянии 0.20 м.

При таком распределении видно, что поровое пространство участвует в фильтрации неравномерно. Основной поток сосредоточен в центральной зоне, где сопротивление движению минимально. В то же время вблизи точек контакта между гранулами скорость падает.

Причина в том, что касательные напряжения в этих областях слишком малы, чтобы преодолеть предел текучести вязкопластической жидкости и заставить её течь. Таким образом, расчёты позволили чётко разделить область на активные зоны фильтрации и зоны застоя.

5. Заключение

Проведенные исследования подтвердили, что пакет ЛОГОС с использованием адаптированного модуля «Логос Прочность» обеспечивает достоверное численное моделирование фильтрации вязкопластических жидкостей в регулярных пористых средах.

Использованный подход позволяет корректно учитывать основные физические особенности: пороговый характер движения, формирование застойных зон и влияние реологических параметров на фильтрационные характеристики.

Литература

1. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. Москва: Мир, 2018. 196 с.
2. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. Москва: Недра, 1972. 288 с.
3. Пакет программ ЛОГОС. Саров, 2012. URL: <https://logos-support.ru/logos/>. Дата обращения: 10.03.2026.
4. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. Санкт-Петербург: Профессия, 2010. 560 с.
5. Шаскольская М.П. Кристаллография. Москва: Высшая школа, 1984. 386 с.
6. ANSYS Fluent. Canonsburg, 2018. URL: <https://www.ansys.com/>. Дата обращения: 08.04.2026.

MSC 76A05, 76S05, 76D99, 76M10

Modeling of Viscoplastic Fluid Filtration in the LOGOS Software Package

E.A. Meshkova¹, A.O. Syromyasov¹

National Research Mordovia State University¹

Abstract: This paper presents the results of a numerical study of viscoplastic fluid filtration through regular porous media, using a hexagonally close-packed structure as an example, performed in the LOGOS software package. Since the hydrodynamic module of LOGOS does not have a built-in Bingham rheological model, the calculations were carried out using an adapted “Logos Strength” module based on an elastoplastic model with viscosity taken into account. A two-stage solver verification was performed for flows in cylindrical pipes of circular and rectangular cross-sections. The patterns of stagnant zone formation and threshold flow behavior were established, and the influence of fluid rheological parameters on effective permeability was evaluated.

Keywords: numerical modeling, filtration, viscoplastic fluid, Shvedov–Bingham model, LOGOS, yield stress, porous medium.