

Образование «вязких пальцев» на межфазных границах при совместном вытеснении трех вязких жидкостей из пористой среды

Научный руководитель – Смирнов Николай Николаевич

Паремская Лусине Акоповна

E-mail: Lusine.paremskaya@gmail.com

Исследованы особенности образования «вязких пальцев» (неустойчивости Саффмана—Теилора) при совместном вытеснении трех жидкостей. Проведено численное моделирование, дополненное графическим интерфейсом для визуализации полученных результатов для данного процесса. В результате трех тестовых расчетов (устойчивость на двух границах раздела жидкостей и два случая неустойчивости одной из межфазных границ) получено подтверждение достоверности результатов численного моделирования и визуализации вытеснения жидкостей из ячейки Хеле—Шоу. Полученные результаты хорошо согласуются с другими теоретическими и экспериментальными работами.

Проведено численное моделирование, дополненное графическим интерфейсом для визуализации полученных результатов для данного процесса. В результате трех тестовых расчетов (устойчивость на двух границах раздела жидкостей и два случая неустойчивости одной из межфазных границ) получено подтверждение достоверности результатов численного моделирования и визуализации вытеснения жидкостей из ячейки Хеле—Шоу. Проведено моделирование полимерного заводнения: вытеснения нефти водой путем закачки дополнительной прослойки между вытесняющей (водой) и вытесняемой (нефтью). Результат расчета демонстрирует принципиальную эффективность использования данного метода как способа увеличения нефтеотдачи и хорошо согласуется с выводами, сделанными в других работах.

При неустойчивости вытеснения на обеих межфазных границах можно заметить быстрый рост «вязких пальцев» левой границы, что приводит к проникновению «пальцев» левой границы в «пальцы» правой. Показан результат расщепления кончиков «вязких пальцев» с последующим формированием так называемых «уголков», которые, в свою очередь, разделяются на два самостоятельных «пальца». Рассматривается динамика образования «вязких пальцев» на левой межфазной границе в случае устойчивого фронта вытеснения на правой межфазной границе. Результаты расчетов продемонстрировали формирование единичных доминантных «пальцев», которые в определенный момент времени осуществляют прорыв сквозь устойчивый фронт вытеснения. Также показано замедление развития остальных «вязких пальцев» непосредственно до момента прорыва и далее. Замечено, что увеличение перепада вязкости на левом фронте приводит к значительному увеличению общего времени вытеснения.

В работе продемонстрировано принципиальное изменение формы «вязкого пальца» в момент прорыва. При фронтальном вытеснении из ячейки Хеле—Шоу замечено, что образовавшиеся формы «пальцев» после прорыва согласуются с «вязкими пальцами», полученными в эксперименте при ради-

альном вытеснении глицерина воздухом из ячейки Хеле—Шоу.

Источники и литература

- 1) Daripa P., Gin C. Studies on Dispersive Stabilization of Porous Media Flows. Phys. Fluids. 2016;28:082105.
- 2) Littman W. Polymer Flooding: Developments in Petroleum Science. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.; 1988. 212 p.

- 3) Логвинов О. А., Мелкумян Л. А. Полимерное заводнение как метод увеличения нефтеотдачи. Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе: Сб. тр. междунард. конф., посвященной дню рождения великого русского математика академика П.Л. Чебышева. Обнинск; 2019. С. 133–143.
- 4) Smirnov N., Nikitin V. F., Maximenko A., Thiercelin M., Legros J. C. Instability and Mixing Flux in Frontal Displacement of Viscous Fluids from Porous Media. *Phys. Fluids*. 2005;17:84–102.
- 5) Benham A. L., Olson R. W. A Model Study of Viscous Fingering. *Soc. Pet. Eng.* 1963;3:138–144.
- 6) Chouke R. L., van Meurs P., van der Poel C. The Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-Liquid Displacements in Permeable Media. *Trans. AIME*. 1959;216:188–194.
- 7) Ben-Jacob E., Godbey R., Goidenfeld N. D., Koplik J., Levine H., Mueller T., Sander L. M. Experimental Demonstration of the Role of Anisotropy in Interfacial Pattern Formation. *Phys. Rev. Lett.* 1985;55:1315–1318.

Иллюстрации



Рис. : Схема течения при заводнении полимерным раствором

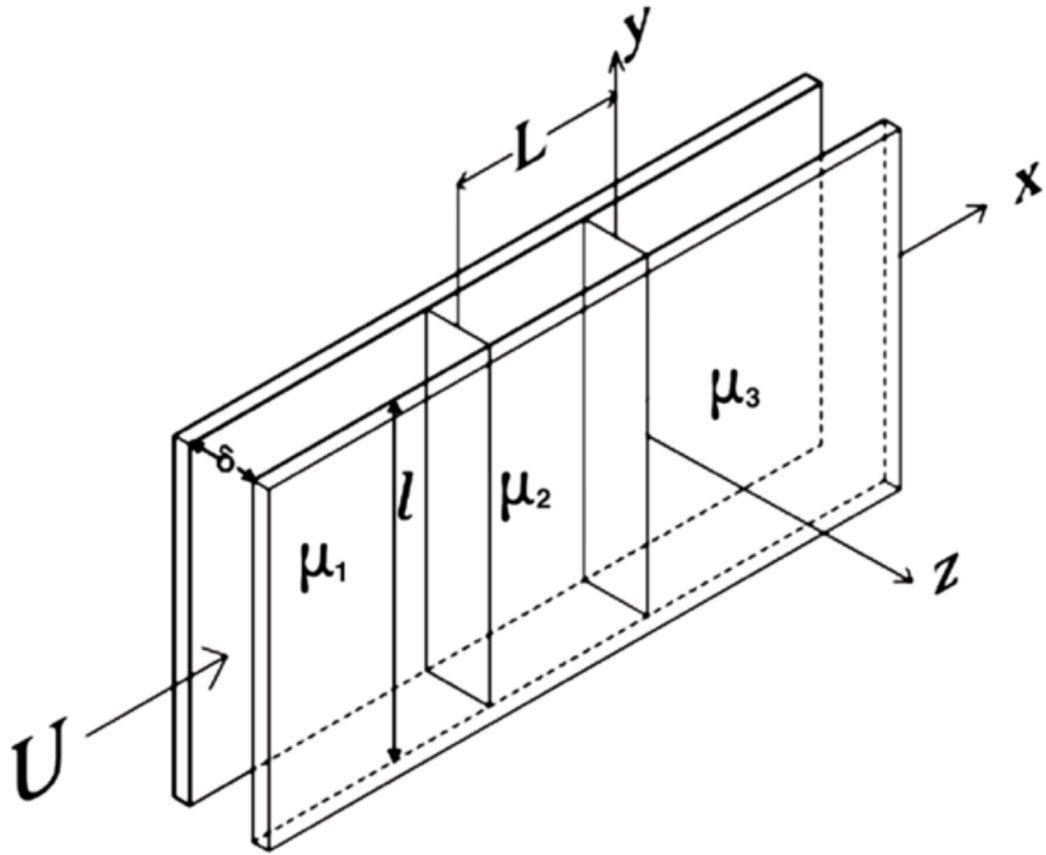


Рис. : Схема многофазного вытеснения из ячейки Хеле—Шоу: U — средняя скорость вытеснения, l — ширина пластин, δ — зазор между пластинами ($\delta \ll l$), L , μ_i — длина зоны и динамическая вязкость i -ой фазы

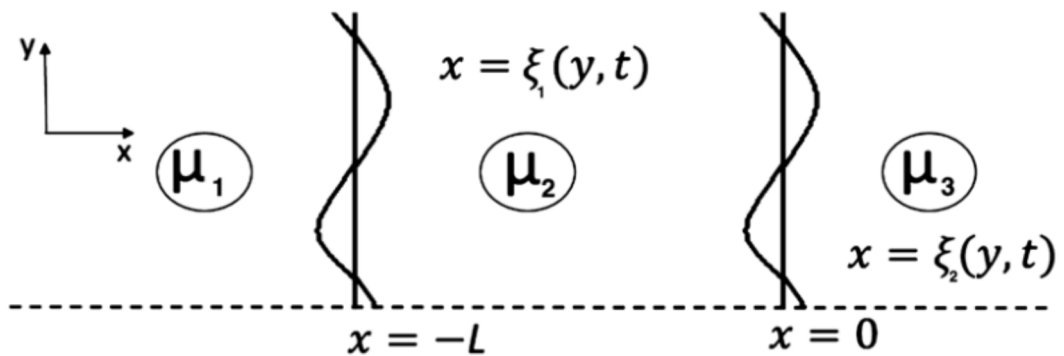


Рис. : Многофазное вытеснение жидкостей: $x = \xi_1(y, t)$ — возмущенная граница между жидкостью с индексом «1» и жидкостью с индексом «2», $x = \xi_2(y, t)$ — возмущенная граница между жидкостью с индексом «2» и жидкостью с индексом «3»

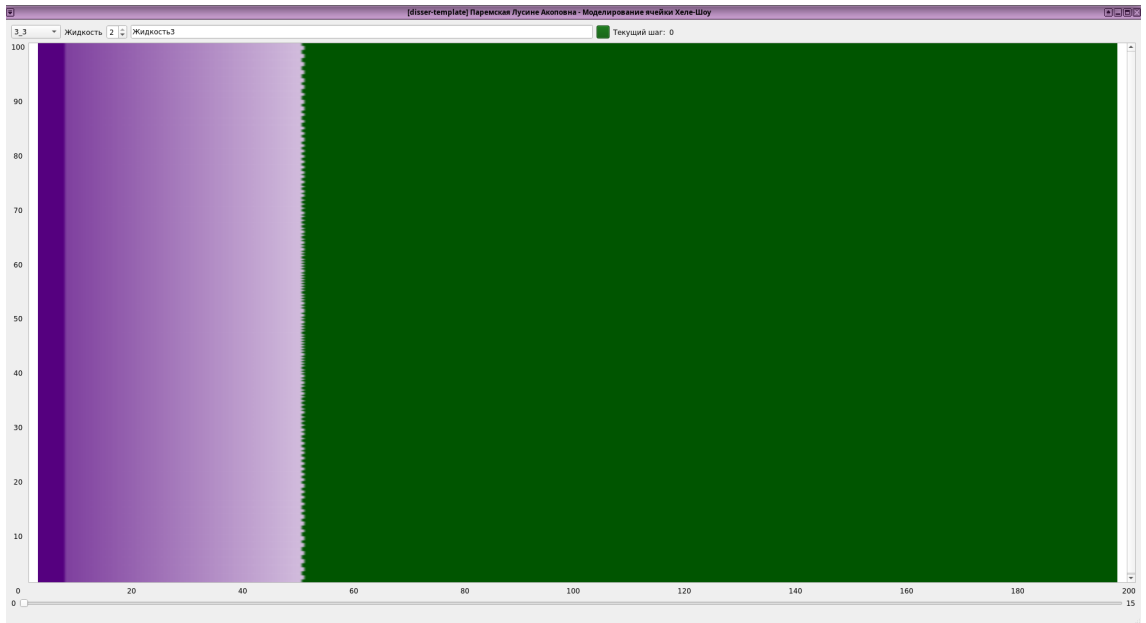


Рис. : Графический интерфейс визуализации данных. Изображение ячейки в начальный момент времени



Рис. : Параметры расчета No1: полимерное заводнение, $t = 29$ с, $Q = 79.9\%$



Рис. : Параметры расчета No2: $M_{-21} = 10^{-2}$ и $M_{-32} = 10^{-1}$

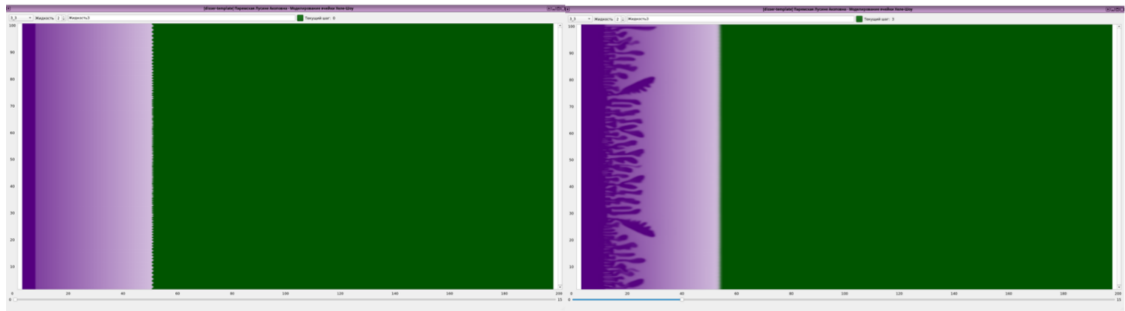


Рис. : Параметры расчета No3: $M_{21} = 10^4$ и $M_{32} = 10^{-1}$

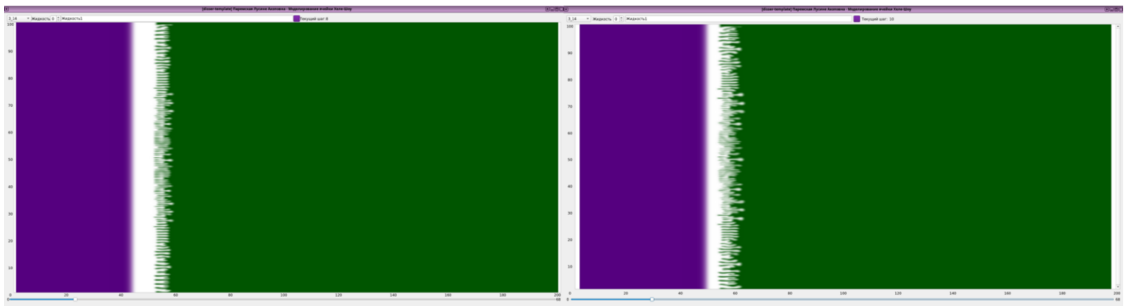


Рис. : Параметры расчета No4: $M_{21} = 10^{-3}$ и $M_{32} = 10$

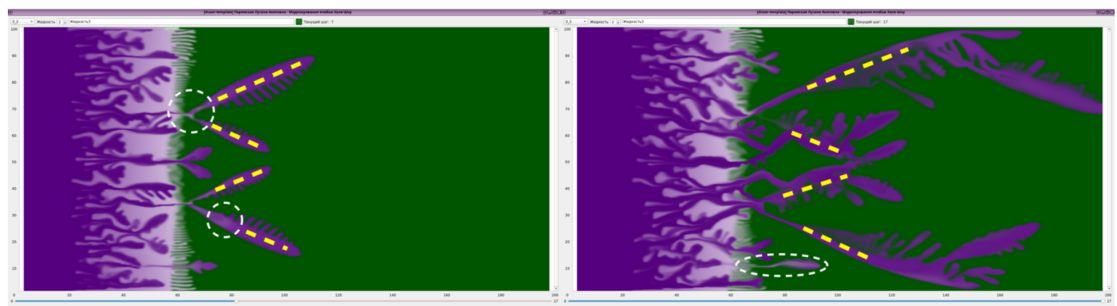


Рис. : Параметры расчета No5: $M_{21} \sim 10^2$, $M_{32} \sim 10$