

ИССЛЕДОВАНИЕ МОБИЛИЗАЦИИ КАПЛИ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРЕ С СУЖЕНИЕМ

А.А. Губайдуллин^{1,2}, А.Ю. Максимов^{1,2}

¹Тюменский филиал ФГБУН Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 625026, Тюмень, Российская Федерация

²ФГБОУ ВПО Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, Российская Федерация

Методам увеличения извлечения природных запасов углеводородов в нефтегазовой промышленности уделяют большое внимание. В частности, вызывает интерес использование вибрационных методов. При использовании метода заводнения нефтяного пласта извлекается в среднем около 30–35% от запасов, а две трети остаётся в недрах [1]. Причин этому несколько. Один из возможных механизмов, действующий в масштабе поры, может быть защемление капель нефти в сужениях пор из-за действия капиллярных сил. Формирование поля упругих колебаний при помощи специальных устройств может привести к повышению продуктивности добывающих скважин и увеличению нефтеотдачи малопродуктивных пластов [3, 4]. Для того чтобы внешнее вибрационное воздействие на горную породу было более эффективным, в частности, чтобы происходила мобилизация капель, зажатых в капиллярах пористой среды, воздействие следует накладывать с частотами близкими к резонансным [5, 6]. Исследования в масштабах капилляра помогают понять механизмы мобилизации остаточной нефти при волновом воздействии. Для выяснения механизма мобилизации капель использовался программный продукт для решения системы уравнений движения жидкости методом конечных объёмов – *ANSYS FLUENT*. Данный программный продукт также позволяет выполнять качественную компьютерную визуализацию процесса мобилизации капли.

Эффективная частота – частота, при которой амплитуда воздействия минимальная. В работе [5] замечено, что эффективная частота внешнего вибрационного воздействия может быть близка к частоте свободных продольных колебаний капли при заданном внешнем статическом перепаде давления. Этот вывод проверим расчётами в *ANSYS FLUENT* в случае капилляра с сужением синусоидальной формы. Зависимость радиуса капилляра r от продольной координаты z задаётся формулой:

$$r(z) = \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2} + \frac{r_{\min} - r_{\max}}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \quad (1)$$

где r_{\min} , r_{\max} – минимальный и максимальный радиусы канала, L – полупериод синусоиды. Задача решалась в осесимметричной постановке. Построена сетка с гексагональными элементами, количество контрольных объёмов составило 36 тысяч, длина расчётной области – 15 мм, параметры $r_{\min} = 0.5$ мм, $r_{\max} = 1.5$ мм, $L = 4$ мм. Использованные значения параметров задачи выглядят следующим образом: плотности жидкостей примем равными $\rho_{\text{water}} = \rho_{\text{oil}} = 998$ кг/м³, динамические коэффициенты вязкости $\mu_{\text{water}} = 1$ мПа·с, $\mu_d = 0.44$ мПа·с, коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 0.025$ Н/м, углы смачивания капли брались равными нулю, объем капли – $V = 12.6$ мм³. На стенке капилляра задавалось граничное условие прилипания. При этом минимальное значение статического перепада давления, при котором капля проходит сужение капилляра, составляло

© А.А. Губайдуллин, А.Ю. Максимов, 2015

$\Delta P_{crit} = 62 \text{ Па}$. При неизменном статическом перепаде давления $\Delta P_{stat} = 24 \text{ Па}$ накладывается волновое воздействие так, что суммарный перепад давления изменялся по закону:

$$\Delta P_{sum} = \Delta P_{stat} - \Delta P_{osc} \cdot \sin(2\pi\nu t) \quad (2)$$

Для каждой фиксированной частоты $\nu = 1, 2, \dots, 8 \text{ Гц}$ подбиралась минимальная амплитуда воздействия, при которой капля проходила через сужение (амплитуда мобилизации капли).

Результаты расчётов показаны на рис. 1. Видно (рис. 1(а)), что зависимость амплитуды мобилизации от частоты является немонотонной и достигает минимума при частоте равной 5 Гц . Вычисленная собственная частота продольных колебаний капли при этом равна 11 Гц . Таким образом, минимум перепада давления, который необходимо приложить при волновом воздействии для того, чтобы капля преодолела сужение, наблюдается в окрестности собственной частоты.

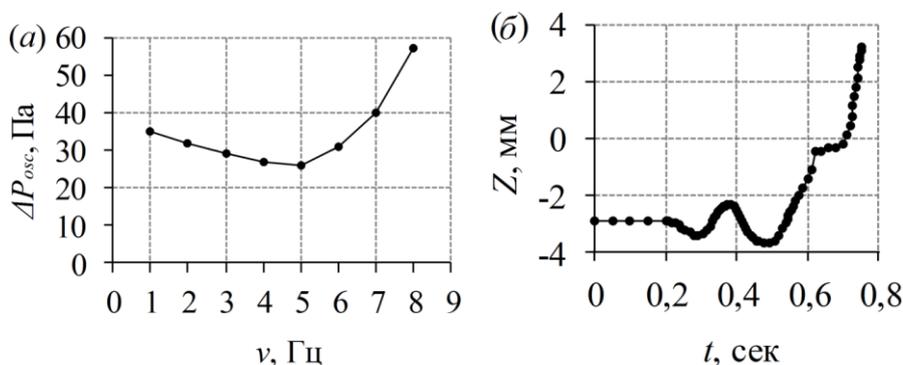


Рис. 1. Зависимости мобилизующей амплитуды волнового воздействия от частоты (а), зависимость координаты центра тяжести капли от времени (б) ($\nu = 5 \text{ Гц}$, $\Delta P_{osc} = 26 \text{ Па}$)

Заметим, что полученное значение суммарной амплитуды волнового воздействия $\Delta P_{sum} = 50 \text{ Па}$ меньше $\Delta P_{crit} = 62 \text{ Па}$, при этом амплитуда ΔP_{sum} действует периодически и кратковременно, в отличие от постоянно действующего перепада ΔP_{stat} . На этом основана эффективность волнового воздействия. На рис. 1 (б) видно, что прежде, чем пройти через сужение, капля под воздействием осцилляционного перепада давления совершает несколько продольных колебаний и, набрав необходимую скорость, проходит через сужение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Отмас А.А. (старший), Отмас А.А.** Коэффициенты извлечения нефти и динамика их изменения в различных нефтегазоносных комплексах на территории Ненецкого автономного округа // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2014. Т.9. №2.
2. **Сердюков С. В., Курленя М.В.** Механизм стимуляции добычи нефти сейсмическими полями малой интенсивности // Акустический журнал. 2007. Т. 53. № 5. С. 703–714.
3. **Максимов Г.А., Радченко А.В.** Моделирование интенсификации нефтедобычи при акустическом воздействии на пласт из скважины. // Акустический журнал. 2005. Т. 51. С. 118–131.
4. **Губайдуллин А. А., Максимов А. Ю.** Моделирование динамики капли нефти в капилляре с сужением // Вестник ТюмГУ. 2013. № 7. С. 71–77.
5. **Губайдуллин А. А., Максимов А. Ю.** Собственные частоты продольных колебаний капли в сужении капилляра // Вестник ТюмГУ. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т.1. № 2(2). С. 85–91.