

# ИЗУЧЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЖИДКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ НАБУХШИХ В ВОДЕ ДИСПЕРСНЫХ ГЕЛЕЙ ПОЛИАКРИЛАМИДА

В.Л. Барабанов, В.Б. Демьяновский, Д.А. Каушанский  
ИПНГ РАН, e-mail: demian20@yandex.ru, dak@ipng.ru

Дисперсные гели полиакриламида (ДГПАА) в сухом виде представляют собой порошок с размером частиц 0.5–2 мм, которые при контакте с водой, в свою очередь, образуют частицы дисперсного геля размером до 10 мм. При этом их объем может увеличиться в тысячу и более раз. Свойство связывать большое количество воды, которая в результате теряет способность к движению, находит применение в технологиях нефтедобычи с управлением потоками пластовых флюидов [1–5]. Существует практическая потребность в лабораторной оценке упругих и реологических свойств этих систем. В статье приводится теоретическое обоснование метода оценки величины модуля Юнга гелевых частиц в полимерно-гелевой системе на основе полиакриламида и методика его экспериментального определения (В.Б. Демьяновский, Д.А. Каушанский, 2014 г.).

## Постановка задачи и определяющие уравнения

Дисперсная гелевая система является двухфазной системой, состоящей из жидкости и взвешенных в ней гелевых частиц. Для упрощения задачи допустим, что эти частицы имеют сферическую форму фиксированного размера. Для определения упругих свойств отдельной частицы будем использовать метод продавливания частицы через отверстие с размером, меньшим, чем размер гелевой частицы, под действием внешнего давления (рис. 1). При прохождении диафрагмы частица деформируется, что создает локальное сопротивление движению жидкости, связанное с упругими свойствами частицы.

В условиях малой деформации процесс продавливания сферической частицы через круглое отверстие можно описать следующей математической моделью.

Капля с радиусом  $R$  примыкает к плоскому круговому отверстию, радиус которого  $R_0$ . На каплю действует нарастающее со временем давление  $p(t)$ . Требуется найти условия прохода капли через отверстие при достижении порогового перепада давления  $\Delta p_{\max}$ .

Уравнение упругого равновесия:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \text{grad} \cdot \text{div} \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор смещения,  $\lambda$  и  $\mu$  – константы Ламе.

Используем известные связи упругих констант:

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad - \text{ модуль сдвига; } \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad -$$

$$\text{коэффициент Пуассона; } E = 2\mu + \mu \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad - \text{ модуль Юнга; } K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \lambda + \frac{2}{3}\mu \quad -$$

коэффициент всестороннего сжатия.

Деформацию гелевой частицы опишем законом Гука:

$$\sigma_{ij} = Ku_{ll}\delta_{ij} + 2\mu(u_{ij} - \frac{1}{3}u_{ll}\delta_{ij}), \quad (2)$$

где  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$  - символ Кронекера.

Обратный закон Гука:

$$u_{ij} = \frac{1}{9K}\sigma_{ll}\delta_{ij} + \frac{1}{2\mu}(u_{ij} - \frac{1}{3}u_{ll}\delta_{ij}). \quad (3)$$

Построим решение одномерной задачи для нашего случая.

$$\mathbf{u} = u \cdot \vec{i}_x. \quad (4)$$

Из (3) следует, что

$$u_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E}\sigma_{xx} = -\frac{\Delta p}{E}. \quad (5)$$

Решение уравнения (5):

$$u = -\frac{\Delta p}{E}x. \quad (6)$$

Капля проходит через отверстие при  $u=R_0-R$ . Следовательно,

$$R - R_0 = -\frac{\Delta p_{\max}}{E}R. \quad (7)$$

Из решения (7) можно определить модуль Юнга  $E$  при достижении порогового (максимального) перепада давления, необходимого для прохода капли через отверстие:

$$E = \Delta p_{\max} \frac{R}{R - R_0} = \Delta p_{\max} \frac{1}{1 - R_0/R}. \quad (8)$$

### Экспериментальная часть

Полимерно-гелевая система (ПГС) – суспензия гелей - была приготовлена путем смешения 5%-го водного раствора хлорида натрия с порошкообразным полиакриламидом

(с молекулярной массой  $20 \cdot 10^6$  а.е.м. и степенью гидролиза 30%), предварительно подвергнутым сшиванию ионизирующим излучением в твердой фазе дозой 10 кГр. Массовая концентрация полимера в ПГС составляла 0,75%.

Из соотношения (8) следует, что для определения модуля Юнга гелевой частицы необходимо провести два эксперимента: 1) измерить частицы (в единицах размера отверстия диафрагмы); 2) измерить величину порогового давления, необходимого для продвижения частицы геля через отверстие диафрагмы.

Определение размеров набухших частиц геля производили двумя методами:

1) по цифровой фотографии в стеклянной кювете на фоне плоского источника белого света (монитора компьютера), фотография кюветы (размером 30x40x100 мм) с ПГС приведена на рис. 2а;

2) по фотографии частиц гелей в чашке Петри с использованием метода темного поля (косого освещения), такой прием позволяет одновременно сравнивать размер набухших частиц и частиц исходного сухого полимера (рис. 2 б, в).

Измерение порогового давления  $\Delta P_{\max}$ , при котором происходит продавливание упругой частицы через отверстие в диафрагме, проводилось на устройстве (принципиальная схема его показана на рис. 3). Это устройство можно представить в виде цилиндрической ячейки, в нижней части ее находится диафрагма, а в верхней – подвижный поршень. Ячейка частично заполняется образцом полимерно-гелевой системы, а оставшийся ее объем – газом. Подвижный поршень плавно сжимает газ, повышая его давление. Давление газа в ячейке передается на жидкость и продавливает ее через отверстие диафрагмы. При наличии на диафрагме частицы геля, которая перекрывает поток жидкости, давление газа возрастает до того момента, когда частица продавится через диафрагму. Это давление принимается за величину  $\Delta P_{\max}$  в уравнении (8). Определение предельного давления производится по диаграмме зависимости давления газа в ячейке от времени регистрации при продвижении ПГС через диафрагму.

Для проведения лабораторных экспериментов было собрано устройство, состоящее из ячейки с диафрагмой, поршневого насоса на базе медицинского дозатора, образцового манометра, тензометрического датчика давления газа фирмы Honeywell, регистратора аналогового сигнала «S-Recorder-L», компьютера с программным обеспечением регистратора. Условия проведения исследования: объем ПГС – 60 мл; объем газа – 70 мл; скорость сжатия газа – 100 мл/час. Результаты записи давления газа в ячейке, заполненной

испытуемой ПГС, в зависимости от времени представлены на рис. 4. Они отражают характерное течение ПГС через диафрагму в виде пилообразной кривой. Максимумы ее связаны с прохождением отдельной частицы через отверстие диафрагмы. Анализ графика показывает, что амплитуды этих максимумов различны. Различные амплитуды сигналов объясняются разными размерами частиц геля. В связи с этим при определении модуля упругости были выбраны наибольший размер частиц и наибольшая амплитуда сигнала.

Измеренный максимальный размер частиц геля – 5 мм., диаметр отверстия диафрагмы – 2 мм, максимальная амплитуда сигнала – 0.0073 В. С учетом калибровочного коэффициента перевода в единицы давления ( $K=849$  кПа/В) получаем значение  $\Delta P_{\max}=6.2$  кПа. По формуле (8) вычисляем значение модуля упругости, равное 15 кПа.

Представляет интерес использование формулы (8) для оценки  $\Delta P_{\max}$  при продавливании гелей через отверстия, сопоставимые по размеру с поровыми каналами нефтяного коллектора, например, 0.2 мм. В этом случае на основании формулы (8) получим значение искомой величины

$$\Delta P_{\max} = E \cdot (1 - R_0/R) = 15 \cdot (1 - 0,2/5) = 14 \text{ кПа.}$$

Эта величина больше, чем опытные данные  $\Delta P_{\max}=6.2$  кПа при более крупном отверстии диафрагмы. Естественно, что частицы ПГС предпочтительнее будут двигаться через крупные каналы, чем через малые каналы. Иными словами, ПГС обладает селективностью по отношению к каналам разного размера.

Следует отметить, что информация, представленная на рис. 4, может служить важной характеристикой как самой ПГС, так и механизма ее течения через каналы ограниченного размера. Кривую, приведенную на рис. 4 в виде зависимости давление–время, можно преобразовать (учитывая однозначную связь давления и объема по закону идеального газа) в зависимость скорости истечения жидкости из измерительной ячейки от времени. Результаты этого преобразования показаны на рис. 5. Для этой зависимости характерным является наличие временных импульсов малой продолжительности и разной амплитуды. Амплитуда импульса соответствует скорости течения жидкости после продавливания частицы геля через отверстие в диафрагме. Импульсный характер движения ПГС через небольшое отверстие позволяет предположить аналогичный характер движения и в других случаях, где может происходить движение частиц через каналы ограниченного размера, например, в пористой среде коллектора углеводородов.

Это может служить дополнительным фактором интенсификации нефтедобычи за счет механического воздействия на пластовые флюиды.

### Выводы

Теоретически обоснован и разработан метод определения модуля упругости частиц гелей полимерно-гелевой системы на основе водной суспензии гелей полиакриламида типа «Темпоскрин». Экспериментально показана возможность «импульсного течения» дисперсных гелей полиакриламида через малые каналы, и проанализировано влияние такого типа течения на подвижность пластовых флюидов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Каушанский Д.А., Демьяновский В.Б.* Добавка к закачиваемой в пласт воде «Темпоскрин» и способ получения добавки: Патент РФ № 1669404 АЗ. Заявл. 03.04.1989, № 4713456/03; Оpubл. 10.06.1999. Бюл. № 16.

2. *Каушанский Д.А.* Улучшение показателей разработки нефтяных месторождений при использовании полимерно-гелевых систем «Темпоскрин» // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2008. № 7. С. 36–46.

3. *Каушанский Д.А.* Многофункциональная инновационная технология повышения нефтеотдачи пластов на поздней стадии разработки «Темпоскрин-Люкс» // Теория и практика применения методов увеличения нефтеотдачи пластов: Материалы IV Междунар. науч. симп. М., 2013. Т. 1. С. 168–172.

4. *Шувалов С.А., Винокуров В.А., Хлебников В.Н.* Применение полимерных реагентов для увеличения нефтеотдачи пласта и водоизоляции // Труды РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2013. № 4. С. 273.

5. *Дмитриевский А.Н., Каушанский Д.А.* Результаты промысловых испытаний и внедрения полимерно-гелевой технологии «Темпоскрин» в условиях нефтяных месторождений НК «Роснефть» // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. № 12. С. 44–50.

### REFERENCES

1. *Kaushanskiy D.A., Dem'yanovskiy V.B.* Dobavka k zakachivaemoy v plast vode «Temposkrin» i sposob polucheniya dobavki: Patent RF № 1669404 A3. Zayavl. 03.04.1989, № 4713456/03; Opubl. 10.06.1999. Byul. № 16.

2. *Kaushanskiy D.A.* Uluchshenie pokazateley razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy pri ispol'zovanii polimerno-gelevykh sistem «Temposkrin» // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy. 2008. № 7. S. 36–46.

3. *Kaushanskiy D.A.* Mnogofunktsional'naya innovatsionnaya tekhnologiya povysheniya nefteotdachi plastov na pozdney stadii razrabotki «Temposkrin-Lyuks» // Teoriya i praktika primeneniya metodov uvelicheniya nefteotdachi plastov: Materialy IV Mezhdunar. nauch. simp. M., 2013. T. 1. S. 168–172.

4. *Shuvalov S.A., Vinokurov V.A., Khlebnikov V.N.* Primenenie polimernykh reagentov dlya uvelicheniya nefteotdachi plasta i vodoizolyatsii // Trudy RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina. 2013. № 4. S. 273.

5. *Dmitrievskiy A.N., Kaushanskiy D.A.* Rezul'taty promyslovykh ispytaniy i vnedreniya polimerno-gelevoy tekhnologii «Temposkrin» v usloviyakh neftyanykh mestorozhdeniy NK «Rosneft'» // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy. 2005. № 12. S. 44–50.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

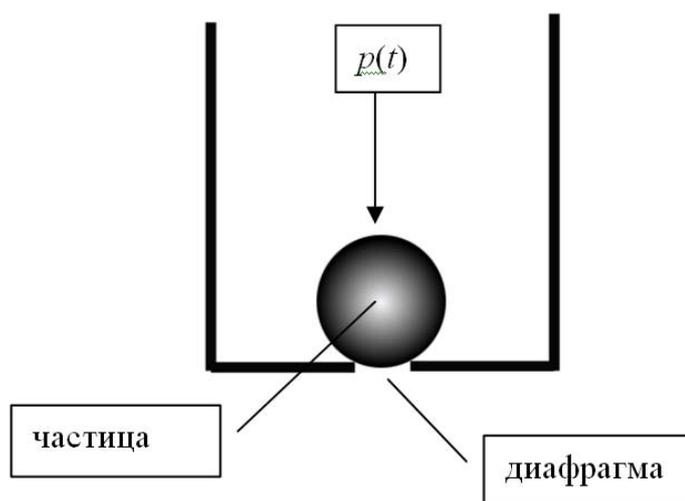


Рис.1. Схема эксперимента (см. текст)

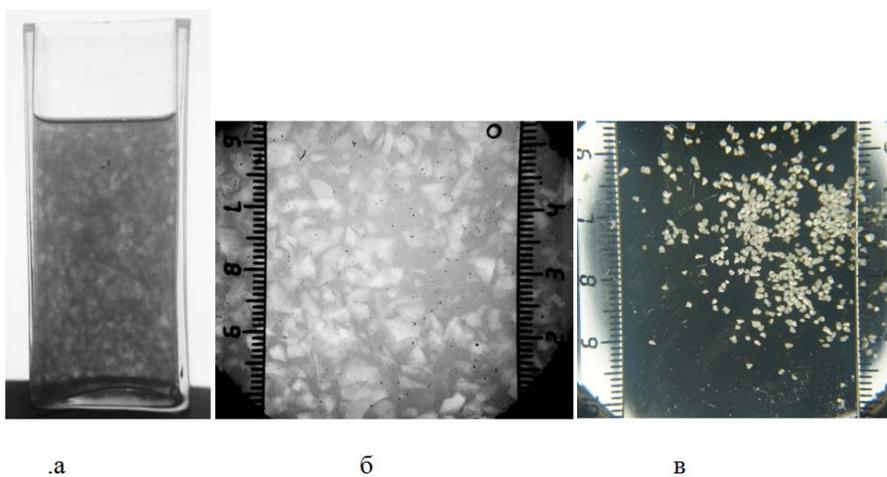


Рис. 2. Измерение размеров дисперсных гелей в кювете (а) и в чашке Петри в набухшем (б) и сухом (в) виде

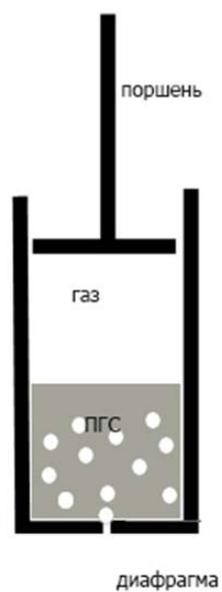


Рис. 3. Схема измерения упругих свойств полимерно-гелевой системы

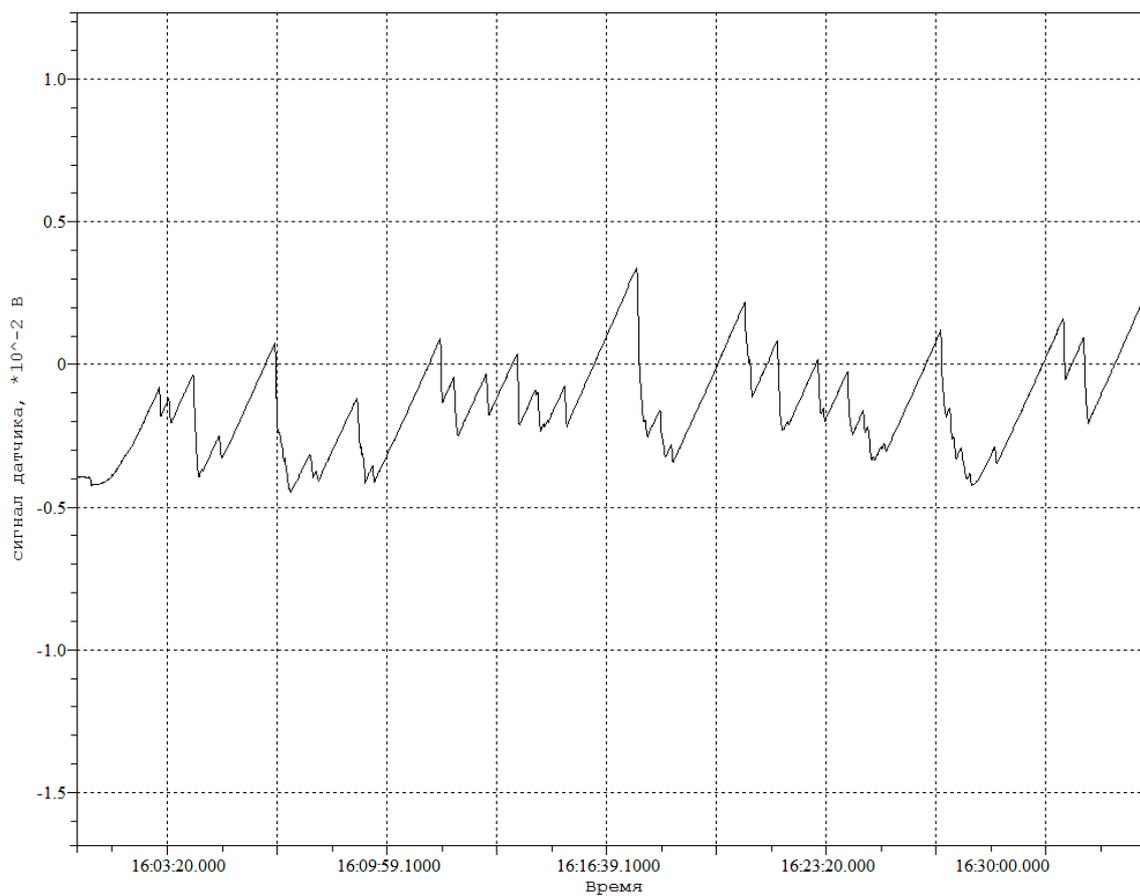


Рис. 4. Запись зависимости сигнала датчика давления от времени при течении ПГС через отверстие диафрагмы диаметром 2 мм

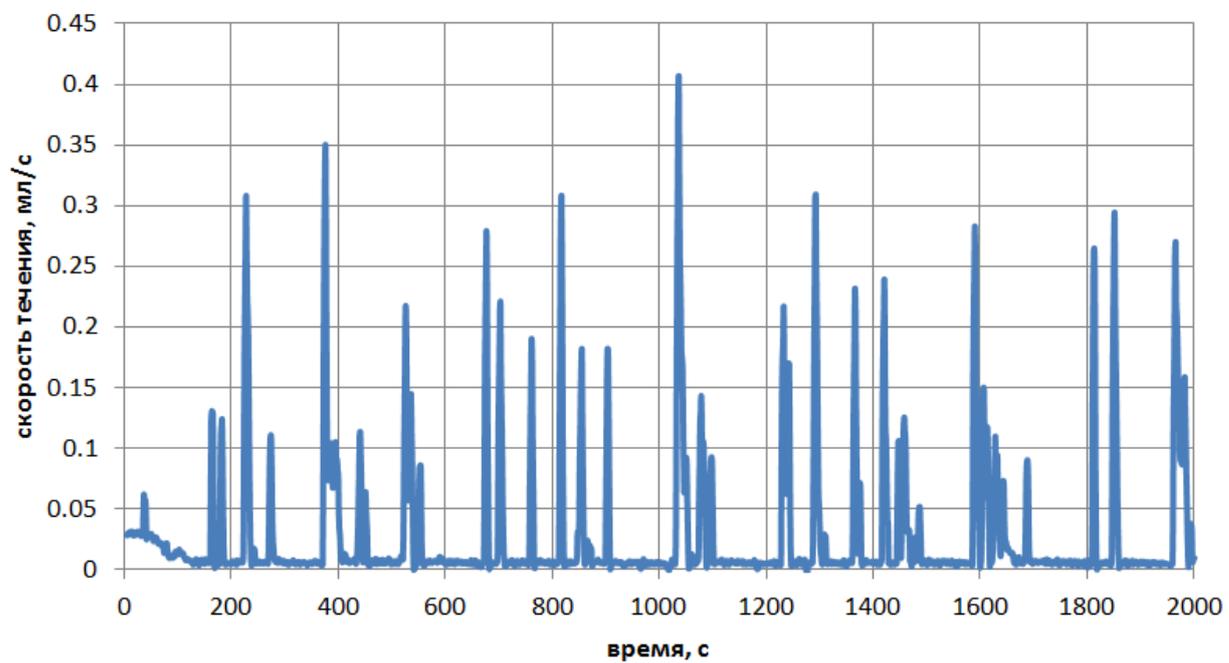


Рис. 5. Зависимость скорости течения дисперсной ПГС «Темпоскрин» через отверстие в диафрагме от времени