

НОВЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МИКРОТРЕЩИНАХ

М.А.Мамедова

*Азербайджанская государственная нефтяная академия,
AZ 1010, Баку, просп. Азадлыг, 20*

В статье были использованы результаты теоретического изучения радиального течения вязко-пластической дисперсной системы в плоском капилляре. На основе обобщения результатов теоретического изучения получены формулы для определения расхода жидкости и распределения скорости для любой жидкости в любой щели с раскрытием $h < h_{kp}$. Также предложены методы расчета расхода жидкости в микротрещинах. При этом экспериментальные и расчетные значения расходов жидкости совпадают с пределами допустимой точности. Использование результатов теоретического изучения радиального течения вязкопластической дисперсной системы в плоском капилляре при расчетах показывает достоверность проведенных экспериментальных исследований в микротрещине.

Разработанный экспериментальный метод изучения плоскорадиального движения жидкости в микротрещине в дальнейшем путем обобщения экспериментальных исследований с учетом системы трещин различных форм и ориентаций может быть использован для оценки фильтрации жидкостей в чисто трещиноватых средах.

Изучение некоторых вопросов в трещинных коллекторах, на основе которых становится возможным решение основных задач при разработке месторождений с трещиноватыми коллекторами, является весьма перспективным.

В связи с этим нами ранее было проведено экспериментальное исследование движения жидкости в радиальной щели, изучено влияние основных факторов на реологические параметры течения систем трещин (Гурбанов, Мамедова, 1996).

На рис.1 представлена конструкция щелевой модели, имитирующей плоскорадиальное движение жидкости в недеформируемой среде.

Щелевая модель представляет собой две цилиндрические плиты 6 и 2 диаметром 168 мм, зажатые между фланцами 1 и 7.

Под действием перепада давления исследуемая жидкость через штуцер 8 поступает в щель между плитами, затем во втулку 5, герметизирующую резиновыми уплотнениями 3 кольцевую полость, и далее в систему для замера протекающего объемного количества жидкости и штуцер 4.

С целью обеспечения недеформируемости щели плиты, изготовленные из нержа-

веющей стали 40Х, имеют после термообработки ТВЧ поверхность твердость 40-50 единиц по Роквеллу. Внутренняя поверхность плит обработана и отшлифована с точностью, соответствующей 10 классу. Между плитами с целью получения щели заданной раскрытии были расположены несмачиваемые прокладки размерами 5x7 мм под углом 120°. Толщина прокладок выбиралась в зависимости от величины требуемой раскрытии щели.

Для контроля деформации щели использовался индикатор часового типа, установленный на верхней плите модели.

С целью контроля распределения движения вдоль радиуса верхней плиты было просверлено по два отверстия под углом 120°. Радиусы окружностей, на которых просверлены отверстия, равняются 34 и 43 мм.

Экспериментально установлена возможность регулирования реологических свойств жидкости при ее движении в тонких щелях. Так, при определенных значениях величины раскрытии щели h меньше некоторой критической величины раскрытии ($h < h_{kp}$) в случае движения ньютоновских систем проявляются неньютоновские свойства.

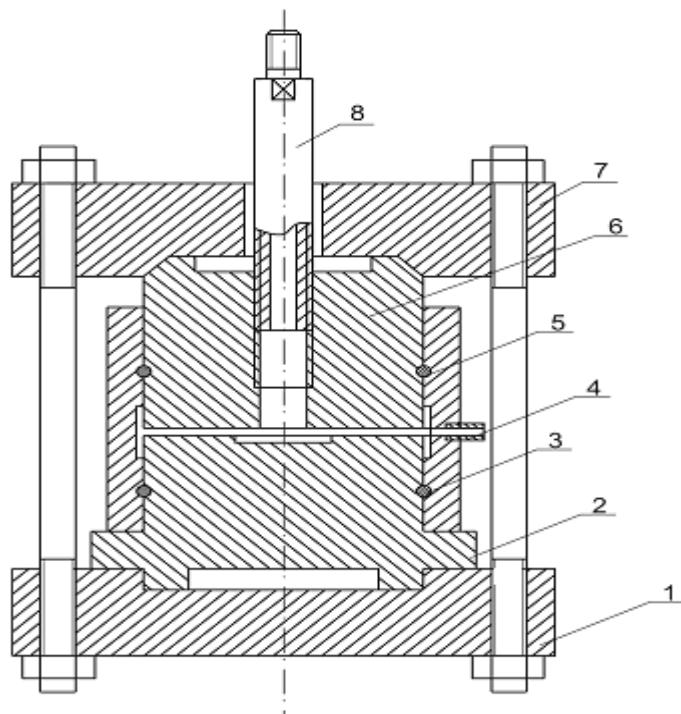


Рис. 1. Модель плоскорадиальной щели

Отметим, что при $h > h_{\text{кр}}$ вышеуказанные изменения в свойствах жидкости практически исчезают. На основе экспериментальных данных определено критическое значение раскрытия щели $h_{\text{кр}}$, т.е. установлено, что при $h \geq h_{\text{кр}}$ практически отсутствует молекулярное взаимодействие между жидкостью и твердой стенкой. Также определены зависимости реологических констант вязкой жидкости от раскрытия щели и критических значений $\eta_{\text{кр}}$, $\tau_{0\text{кр}}$, $h_{0\text{кр}}$ при различных температурах.

Представляется полезным вывести обобщенную формулу для определения расхода жидкости и распределения скоростей в щели с раскрытием при $h < h_{\text{кр}}$. Рассмотрим движение жидкости в такой щели. Прием, что движение жидкости в рамках вязкопластической модели описывается следующим дифференциальным уравнением и граничными условиями (рис. 2):

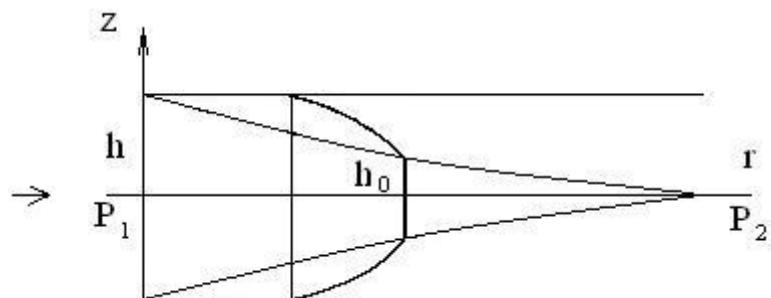


Рис. 2. Эпюра распределения скоростей

$$\begin{aligned} \frac{d^2V}{dZ^2} &= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}; \\ Z &= h; V = 0; \\ Z = h(r) &= h_0; \frac{\partial V}{\partial Z} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Автором работы (Тябин, 1954) в результате изучения радиального движения вязко-пластической дисперсной системы в плоском капилляре при вышеуказанных условиях получены формулы для скорости, расхода жидкости и размера ядра.

Приведем эти формулы к удобному для расчета виду. Для этого введем следующие обозначения:

$$\alpha = \frac{h}{h_{kp}}; \beta = \frac{\eta_h}{\eta_{kp}}; \gamma_0 = \frac{\theta_{0h}}{\theta_{max}},$$

$$A = \theta_{max} \gamma_0 r \ln \frac{r_2}{r_1};$$

$$B = \theta_{max} \gamma_0 (r_2 - r_1); C = \beta \eta_{kp} \ln \frac{r_2}{r_1},$$

где θ_{0h} – предельное напряжение сдвига жидкости в щели с раскрытием h ;

h_{kp} – значение раскрытия щели, при котором практически отсутствует молекулярное взаимодействие между жидкостью и стенкой щели;

θ_{kp}, η_{kp} – соответственно предельное напряжение сдвига и структурная вязкость при критическом значении раскрытия щели;

θ_{max} – наибольшее значение θ при минимальной раскрытии щели;

V – скорость частицы жидкости;

h – раскрытие щели;

V_0 – скорость ядра;

h_0 – размер ядра при $Z = h_0$.

После решения вышеуказанных зависимостей получаем данное соотношение:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\left(1 - \bar{Z}\right) \left(1 + \bar{Z} - \frac{4A}{3A + 2\Delta Ph - 3B}\right)}{\left(1 - \frac{2A}{3A + 2\Delta Ph - 3B}\right)^2}, \quad (2)$$

где ΔP – перепад давления на длине r .

В выражении расхода жидкости, если учесть формулы для h_0 и $\frac{\partial p}{\partial r}$, определяющими параметрами являются:

$$M_p = \frac{3qC}{4\pi h_{kp}^2 \alpha^2 (\alpha h_{kp} \Delta P + 3B - 3A)}, \quad (3)$$

$$N = \frac{A}{3A + 2\Delta Ph_{kp} - 3B}. \quad (4)$$

Таким образом, получены зависимости между параметрами

$$M = 1 - 3N + 8N^3; \quad (5)$$

$$K = \frac{V}{V_0} = \frac{(1 - \bar{Z})(1 + \bar{Z} - 4N)}{(1 - 2N)^2}, \quad (6)$$

где $\bar{Z} = \frac{Z}{h}$, $0 \leq N \leq 1$.

Отметим, что при обобщении результатов исследования за основу были приняты выводы, полученные в работе (Гурбанов, Мамедова, 1992), где было отмечено, что зависимости $M = f(N)$ при различных величинах раскрытия и перепада давлений для ньютоновских и неニュтоновских жидкостей укладываются на одну прямую. Это дает основание провести исследование на радиальной щели только для воды и обобщить полученные результаты для всех ньютоновских и неニュтоновских жидкостей (при $h < h_{kp}$).

По формулам (5) и (6) можно определить расход жидкости и распределение скоростей для любой жидкости в любой щели с раскрытием $h < h_{kp}$. Результаты расчетов по зависимостям (5) и (6) представлены на рис.3 и рис. 4.

На рис. 3 также приводится зависимость $M = f(N)$, построенная на основе экспериментальных данных (кривая 2), полученная при температуре 303 К для различных величин раскрытия и перепада давлений для ньютоновских и неニュтоновских жидкостей. Как видно из рис.3, кривые 1 и 2 не укладываются на одной прямой. Для внесения поправки построена зависимость для отношений M_p/M от N (рис.5).

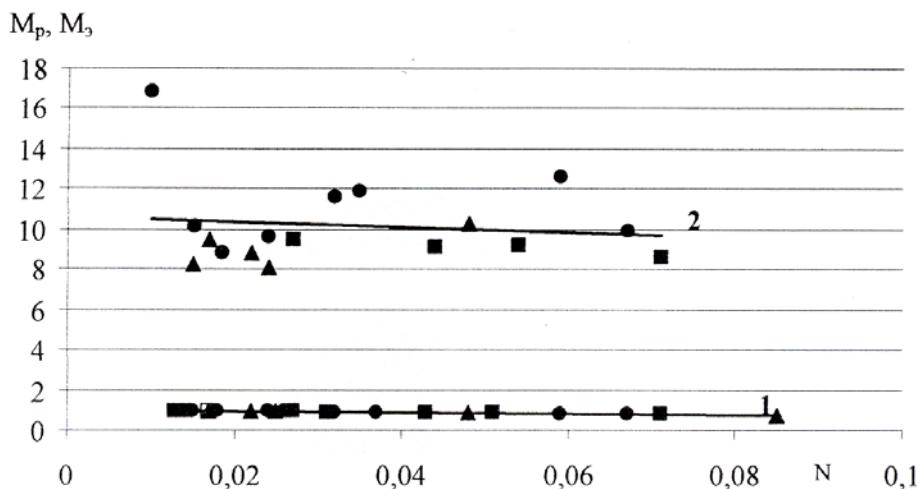


Рис. 3. Зависимость M_p (кривая 1) и M_s (кривая 2) от N .
Значения раскрытия щели ($h \cdot 10^{-6}$ м) здесь и на рис. 4-5: ●-10, ▲-15, ■-20

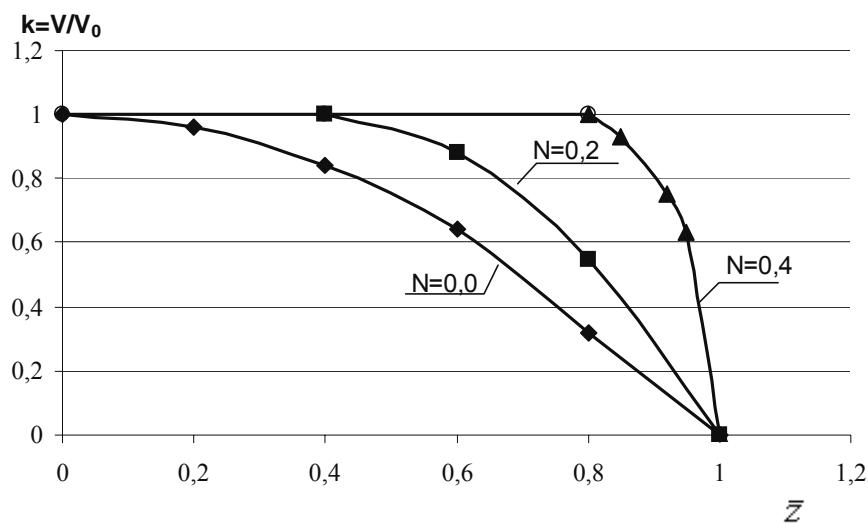


Рис. 4. Зависимость k от \bar{z}

Уравнения зависимости имеют вид:

$$\frac{M_p}{M_s} = 0,0063N + 0.0895; \quad (7)$$

$$M_s = \frac{3qC}{4\pi h_{kp}^2 \alpha^2 (\alpha h_{kp} \Delta P + 3B - 3A)}. \quad (8)$$

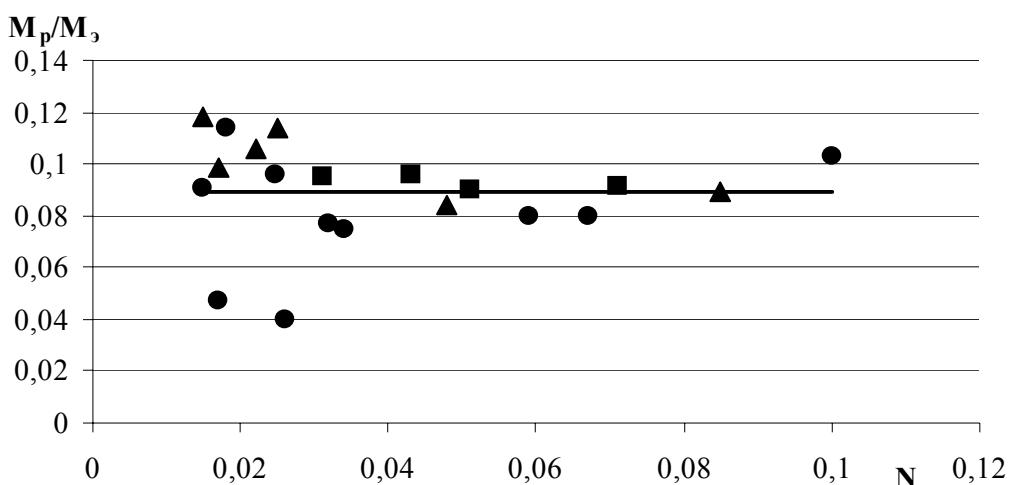
Методика расчета заключается в следующем. Предположим, что требуется определить расход жидкости в радиальной щели радиусом $R=84 \cdot 10^{-3}$ м и раскрытии 10^{-5} м при

температуре 303 К и перепаде давлений $\Delta P=1.25 \cdot 10^5$ Па, при этом $h_{kp}=3 \cdot 10^{-5}$ м. Для этого находим следующие параметры по методике (Мамедова, 1997).

$$\gamma_0 = \frac{\theta_{0h}}{\theta_{kmax}} = 1,129 - 1,162 \frac{h}{h_{kp}};$$

$$\beta = \frac{\eta_h}{\eta_{kp}} = 2,459 - 1,579 \frac{h}{h_{kp}};$$

$$\text{при } \alpha = \frac{h}{h_{kp}} = 0,33; \gamma_0 = 0,8; \beta = 2,05.$$

Рис. 5. Зависимость M_p/M_3 от N

Далее определяем величину N_s

$$N_s = \frac{A}{3A + 2\Delta P \alpha h_{kp} - 3B} = 0.034.$$

Затем, определив M_p по формуле (5), находим из выражения (7) величину M_3 . И, наконец, по формуле (8) определяем q_s , $M_p = 0,895$ и $M_3 = 9,800$.

Расход жидкости в щели будет:

$$q_s = \frac{4\pi h^2 \alpha^2 (\alpha h_{kp} \Delta P + 3B - 3A) M_3}{3C} = 1.22 \cdot 10^{-6}.$$

Значение q_s , полученное в результате эксперимента, равно $1.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Как видно, экспериментальные и расчетные значения расходов жидкости совпадают в пределах допустимой точности.

Таким образом, использование результатов теоретического изучения радиального течения вязкопластичной дисперсной сис-

темы в плоском капилляре при расчетах показывает достоверность проведенных экспериментальных исследований в микротрещине.

Разработанный экспериментальный метод изучения плоскорадиального движения жидкости в микротрещине в дальнейшем путем обобщения экспериментальных исследований с учетом системы трещин различных форм и ориентаций может быть использован для оценки фильтрации жидкостей в чисто трещиноватых средах.

ЛИТЕРАТУРА

- ГУРБАНОВ, Р.С., МАМЕДОВА, М.А. 1992. Теоретико-экспериментальный метод изучения движения жидкостей в тонких микротрещинах. *Нефть и газ.* 7, 41-45.
- ГУРБАНОВ, Р.С., МАМЕДОВА, М.А. 1996. Об особенностях плоскорадиального движения несжимаемой вязкой жидкости в тонких щелях. *Нефть и газ.* 1-2, 53-55.
- МАМЕДОВА, М.А. 1997. Некоторые результаты изучения реологических свойств ньютоновских жидкостей при движении в плоскорадиальной щели. *Нефть и газ.* 1-2, 45-47.
- ТЯБИН, Н.В. 1954. Радиальное течение вязкопластичной дисперсной системы в плоском капилляре. *Докл. АН СССР*, ХСВ1, 1, 29-32.

Рецензент: член-корр. НАН Азербайджана Г.И.Джалалов