

УДК 532
ББК 22.21
Б 14

Р.А. Багов, Р. Цей

Об основных понятиях теории фильтрации и основных этапах ее развития

(Рецензирована)

Аннотация:

В работе определены основные понятия теории фильтрации. Также приведена краткая история развития подземной гидромеханики как науки и, в частности, теории фильтрации, кратко представлены результаты отечественных и зарубежных ученых, внесших наиболее весомый вклад в развитие данной науки.

Ключевые слова:

Подземная гидромеханика, теория фильтрации, Закон Дарси, пористая и (или) трещиноватая среда, флюиды.

Общеизвестным является факт, что природные жидкости – нефть, газ, подземные воды – находятся в недрах Земли, точнее, в подземных пустотах – *порах и трещинах* горных пород. Эти природные жидкости принято называть *флюидами*. Флюиды, вследствие естественных процессов или в результате деятельности человека, находятся в постоянном движении. Движение флюидов через твердые тела, содержащие связанные между собой поры или трещины, называется *фильтрацией*.

Горные породы, которые могут служить местами хранения флюидов и через которые они могут двигаться, называются *пластами* или *пластами-коллекторами*.

Свойства горной породы (пласта) вмещать и пропускать через себя жидкость (флюид) называются *фильтрационно-емкостными свойствами пласта (ФЕСП)*, среди которых: пористость, проницаемость, скорость фильтрации и т.д.

Наука о движении жидкостей, газов и их смесей – флюидов – в пористых и трещиноватых средах называется *подземной гидромеханикой*. Поскольку эта наука изучает разнообразность механического движения, то ее часто считают разделом механики сплошных сред.

Теория фильтрации – теоретическая основа подземной гидромеханики, описывающая движение флюидов с позиции механики сплошной среды.

Подземная гидромеханика получила развитие в связи с потребностями таких областей жизнедеятельности человека как: использование грунтовых вод, разработка нефтяных и газовых месторождений, проектирование и эксплуатация гидротехнических сооружений, мелиорация и т.д.



Рис 1. Изображение пористой среды (срез)

Начало систематическому изучению особенностей фильтрации жидкости в пористой среде было положено трудами французского инженера **Анри Дарси** в середине XIX века. В то время А. Дарси был мэром города **Дижон (Франция)** и создавал первую совершенную систему водоснабжения. А. Дарси экспериментально установил линейную зависимость скорости фильтрации воды через песчаный фильтр от разности напоров воды на входе и выходе

фильтра и сформулировал закон, получивший его имя.

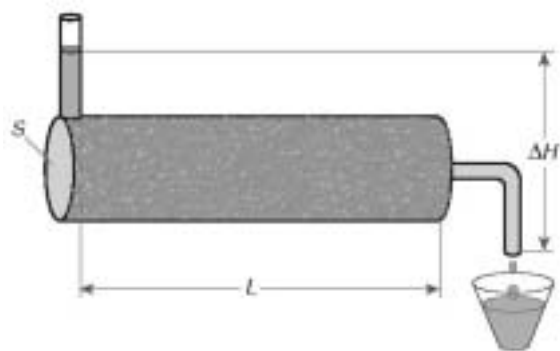


Рис 2. Схема опыта Дарси

В современной трактовке закон Дарси представляется в следующем виде:

$$\vec{w} = -\frac{k}{\eta} \text{grad } p \quad (1),$$

где

- \vec{w} – вектор скорости фильтрации,
- k – коэффициент проницаемости,
- η – динамическая вязкость флюида,
- p – приведенное давление.

Теоретическое обоснование опытного закона Дарси было выполнено другим французским ученым **Ж. Дюпюи**, который получил формулу для определения объемного расхода (дебита) скважин. Формула Дюпюи нашла широкое применение в практических расчетах дебитов скважин.

До начала нынешнего века развитие подземной гидромеханики было связано, главным образом, с решением задач движения грунтовых вод. Австрийский ученый **Ф. Форхгеймер** впервые применил методы теории потенциала для решения ряда фильтрационных задач. Существенный вклад в развитие представлений о структуре порового пространства и влиянии свойств пористой среды на движение в ней флюидов внес **Ч. Сликтер**. Им предложены фиктивная и идеальная модели пористой среды, исследованы такие важные фильтрационные характеристики пористой среды, как *проницаемость* и *пористость*.

Известный русский механик **Н.Е. Жуковский** впервые сформулировал общие задачи теории фильтрации, вывел дифференциальные уравнения движения и решил ряд конкретных задач о притоке воды к скважине [1].

В 1922 г. была опубликована монография советского ученого **Н.Н. Павловского**, который задачи подземной гидромеханики рассматривал как краевые задачи математической физики и указал общие приемы их решения.

Н.Н. Павловский установил границы существования линейного закона Дарси и предложил для их определения использовать безразмерный *критерий Рейнольдса*.

С ростом в мире промышленной добычи нефти и газа, увеличением глубин залегания вновь открываемых нефтяных и газовых месторождений получило развитие новое направление теории фильтрации – *нефтегазовая подземная гидромеханика*. Появление и развитие этого направления были обусловлены необходимостью создания научных основ рациональной разработки нефтяных и газовых месторождений.

Особенностью фильтрации нефти и газа в пласте является тот факт, что нефть и газ в природных условиях представляют собой сплошные многокомпонентные системы и приходится учитывать влияние физико-механических процессов, проходящих при движении таких систем, на параметры движения нефти и газа.

Первые фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования в области нефтегазовой подземной гидромеханики были выполнены академиком Л.С. Лейбензоном. **Л.С. Лейбензон** вывел дифференциальные уравнения движения газа и газированной жидкости, сформулировал задачи вытеснения нефти водой, проанализировал существовавшие методы подсчета запасов нефти и газа. Л.С. Лейбензоном в 1934 г. впервые был издан капитальный труд, в котором автор обобщил все основные исследования, проведенные им и другими учеными в области подземной гидромеханики [2].

Несколько позднее, в 1937 г., подобная работа была издана американским ученым **М. Маскетом** [3]. Трудом зарубежных исследователей **Р. Коллинза, М. Маскета, С. Бакли, М. Леверетта, Д. Катца, Р. Шилсюиза, У. Херста** освещаются такие вопросы подземной гидромеханики, как *двухфазная фильтрация, приток упругой жидкости к скважине, гидродинамические расчеты продвижения воды в пределы нефтяной или газовой залежи*. **А. Шейдеггер** успешно

применил *методы математической статистики* при изучении структуры парового пространства и фильтрации в нем флюидов [4].

Профессор **В.И. Щелкачев** провел многолетние промысловые исследования по изучению влияния сжимаемости нефти и нефтяного пласта на течение жидкостей и газов, учету взаимодействия нефтяных скважин. Созданная им теория упругого режима работы нефтяного пласта позволила существенно дополнить исследования М. Маскета, Р. Шилсюиза и У. Херста и усовершенствовать методику гидродинамических исследований пластов [5].

Развитие теории фильтрации в наши дни связано с изучением многофакторных процессов движения различных агентов в неоднородных пластах при тех или иных начальных и граничных условиях.

Особое место занимают процессы, связанные с повышением степени извлечения нефти из недр. Это и нагнетание в нефтяные залежи агентов, смешивающихся с нефтью, и термическое воздействие на нефтяной пласт, и закачка различных растворов.

При этом система дифференциальных уравнений движения флюидов дополняется уравнениями термодинамики, диффузии, конвективного перемешивания, адсорбции и десорбции и т.д.

Решению названных проблем теории фильтрации посвящены труды отечественных ученых **Г.И. Баренблатта, К.С. Басниева, Ю.П. Желтова, Б.Б. Лапука, А.Х. Мирзаджанзаде, В.Н. Николаевского, Г.Б. Пыхачева** и др. [6-12].

В заключении укажем на существование аналогии между математическим описанием некоторых фильтрационных процессов с другими физическими явлениями (диффузией, переносом тепла, электричества и др.).

Единый линейный закон для некоторого потока может быть представлен в виде:

$$\vec{n} = -a \cdot \text{grad } \varphi \quad (2),$$

где

\vec{n} – вектор потока,

a – некоторый коэффициент,

φ – соответствующая потенциальная функция.

Для фильтрационного потока (при $k=const$, $\eta=const$) величиной \vec{n} является вектор скорости, φ – давление и $a = \frac{k}{\eta}$.

В результате получим закон Дарси в виде выражения (1).

Если за \vec{n} принять вектор силы тока, φ – потенциал и a – удельную электропроводность, получим закон Ома в виде:

$$\vec{I} = -\sigma \cdot \text{grad } U \quad (3)$$

Для теплового потока за \vec{n} принимается вектор теплового потока, φ – температура и a – коэффициент теплопроводности. Тогда формула (2) будет записью закона Фурье:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (4).$$

Примечания:

1. Жуковский Н.Е. Собрание сочинений. Т. 3. – М. – Л.: Гослитиздат, 1949. – 700 с.
2. Лейбензон Л.С. Собрание трудов: в 2 т. – М.: АН СССР, 1953. – Т. 2: Подземная гидрогазодинамика, – 544 с.
3. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. – М. – Л.: Гостоптехиздат, 1949. – 628 с.
4. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды: Пер. с англ. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 249с.
5. Щелкачев В.Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 461с.
6. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1984. – 207с.
7. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – М.: Недра, 1993. – 416 с.
8. Желтов Ю.П. Механика нефтегазоносного пласта. – М.: Недра, 1975. – 216с.
9. Лапук Б.Б. Теоретические основы разработки месторождений природных газов. – М. –Л.: Гостоптехиздат, 1948. – 295 с.
10. Мирзаджанзаде А.Х., Степанова Г.С. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа. – М.: Недра, 1977. – 229 с.
11. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. – М.: Недра, 1984. – 232 с.
12. Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика. – М.: Недра, 1973. – 360 с.