УДК 532.546.7

НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНА ДАРСИ

© 2011 г.

П.С. Чагиров, В.В. Кадет

Российский госуниверситет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва

jawapaul@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Проведено перколяционное моделирование процесса течения ньютоновской жидкости в пористой среде. Анализ течения на микроуровне позволил получить макроскопический закон фильтрации, а также критические значения градиентов давления, которые определяют границы применимости закона Дарси. Исследовано влияние параметров среды на значения пороговых градиентов. Показано, что при больших градиентах давления закон Дарси наиболее хорошо работает в мелкопоровых коллекторах и нарушается во всем диапазоне градиентов для крупнопоровых пород, а при низких градиентах линейный закон фильтрации выполним только для крупнопоровых пород.

Ключевые слова: ньютоновская жидкость, течение в пористой среде, перколяционное моделирование, закон Дарси.

1. Верхняя граница. Постановка задачи

Рассматривается задача о течении флюида в модели пористой среды – решетке капилляров, которая представляет собой проводящие цепочки из чередующихся пор и капилляров. Эти цепочки сообщаются между собой через аналогичные цепочки капилляров, по которым происходит фильтрация в поперечном направлении. В совокупности проводящие цепочки образуют решетку неправильной формы. Такая модельная пористая структура характеризуется средней длиной капилляра l, функцией плотности распределения капилляров по радиусу $f(r)$ (порометрической кривой) и координационным числом решетки z.

При движении флюида в пористой среде учитываются как линейные гидравлические потери давления, обусловленные силами вязкого трения, так и потери на местных сопротивлениях, связанные с внезапными сужениями и расширениями капилляров:

$$\Delta P = \sum_i \Delta P_{ki} + \sum_i \Delta P_{sij}.$$

Реализовав алгоритм построения перколяционной модели [1, 2], получаем закон фильтрации

$$w = \int_0^{r_c} \frac{2F(r)\,|\nabla P|\,dr}{I_1(r) + (I_1^2(r) + 4I_2(r)\,|\nabla P|)^{1/2}}.$$

Коэффициенты I_1 и I_2 являются для пористой структуры аналогами коэффициентов гидравлического и местного сопротивления. Анализ последнего соотношения показывает, что если потери по длине и местные потери будут одного порядка, произойдет переход от линейного закона фильтрации к нелинейному. Исходя из этого, находим пороговый градиент давления, являющийся границей линейного закона фильтрации:

$$\nabla p^*(r) = \frac{I_1^2(r)}{4I_2(r)}.$$

2. Нижняя граница. Постановка задачи

Взаимодействие полярных жидкостей с породой приводит к возникновению двойного электрического слоя на межфазной границе, основной характеристикой которого является дзета-потенциал. Когда жидкость течет за счет градиента давления через канал, ионы подвижной части ДЭС увлекаются жидкостью, вызывая электрический ток, называемый током протекания. Накопление ионов в области, определяемой направлением течения, является причиной возникновения электрического потенциала, который принято называть потенциалом протекания. В свою очередь, потенциал протекания способствует появлению тока ионов в направлении, обратном направлению течения жидкости (ток проводимости). Данный электрокинетический эффект является причиной искажения профиля течения в капиллярах, и, как следствие, причиной отклонения от закона Дарси. Теоретическое описание течения жидкости в каналах малых размеров (порядка 10^{-8}–10^{-7} м) дано в [3], где закон фильтра-

ционного течения представлен в виде

$$w = \nabla Pl \int_0^{r_c} \left[\int_r^{r_{\max}} \frac{f(r)}{(L_{11} - L_{12}^2 / L_{22})} dr \right]^{-1} F(r) dr.$$

Здесь L_{11} – коэффициент связи между градиентом давления и потоком массы, что является по сути гидропроводностью канала в законе Пуазейля, L_{22} связывает ток с потенциалом и имеет смысл электропроводности, L_{12} характеризует взаимосвязь различных потоков.

Расчеты, учитывающие связь дзета-потенциала с градиентом давления [4], позволяют установить значение критического градиента, при котором закон фильтрации становится линейным.

Решение задач об определении верхней и нижней границ применимости закона Дарси дает точную область его применимости, а также позволяет рассчитывать скорости течения по нелинейным законам фильтрации в соответствующих с областях градиентов давления (рис. 1).

3. Выводы

Исследованы механизмы течения на микроуровне, обусловливающие нелинейный характер макроскопических законов фильтрации при больших и малых градиентах давления.

На базе проведенного теоретического анализа создана методика определения границ справедливости закона Дарси (линейного закона фильтрации).

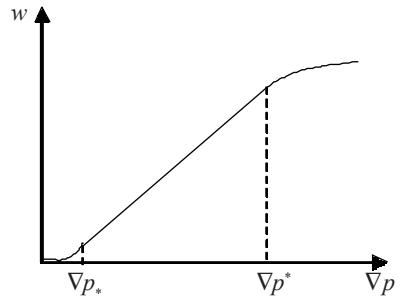

Рис. 1

Список литературы

1. Селяков В.И., Кадет В.В. Перколяционные модели процессов переноса в микронеоднородных средах. М.:1-й ТОПМАШ, 2006. 247 с.

2. Кадет В.В. Методы теории перколяции в подземной гидромеханике. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. 96 с.

3. Кадет В.В., Корюзлов А.С. Эффективная вязкость минерализованной воды при течении в пористой среде. Теория и эксперимент // Теоретические основы химических технологий. 2008. Т. 42, №5.

4. Кадет В.В., Корюзлов П.С. Электроосмотическое течение в тонких щелях. Теория и эксперимент // Прикладная механика и техническая физика. 2009. №5. С. 90–94.

A NEW METHOD FOR DETERMINING THE APPLICABILITY OF THE DARCY LAW

P.S. Chagirov, V.V. Kadet

A percolation simulation of the flow of Newtonian fluids in porous media has been carried out. Flow analysis at the micro-level has yielded a macroscopic filtration law as well as the critical values of pressure gradients that define the limits of the applicability of Darcy's law. The influence of medium parameters on the value of the critical gradients has been investigated. It was proved that at high pressure gradients Darcy's law works well in low-permeable reservoirs and it doesn't work at all over the range of gradients in high-permeable reservoirs. For low gradients the linear filtration law holds only for low-permeable rocks.

Keywords: Newtonian liquid, flow in porous medium, percolation modeling, Darcy law.