

УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Хусаинова Г.Я.

к.ф.-м.н., доцент,

СФ ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»,

Стерлитамак, Россия

Кашапов Д.И.

студент магистратуры,

СФ ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»,

Стерлитамак, Россия

Аннотация

В данной работе систематизированы и рассмотрены основные законы фильтрации при течении ньютоновских и аномальных жидкостей. Показаны факторы, влияющие на фильтрацию жидкости в пористой среде и верхние и нижние границы применимости закона Дарси.

Ключевые слова: фильтрация, аномальная жидкость, поля давления.

RESEARCH OF LAWS OF FILTRATION IN THE POROUS MEDIUM

Khusainova G.J.

PhD of Physical and Mathematical Sciences, Associate professor,

SB of Bashkir State University,

Sterlitamak, Russia

Kashapov D.I.

master student,

SB of Bashkir State University,

Sterlitamak, Russia

Annotation

In this article, the basic laws of filtration in the flow of Newtonian and anomalous liquids are systematized and considered. The factors affecting the filtration of liquid in a porous medium and the upper and lower limits of the applicability of Darcy's law are shown.

Keywords: filtration, abnormal liquid, fields of pressure.

Рассмотрев фильтрацию неньютоновской жидкости, можно определить, что существенную роль будет играть пористая среда. Взаимодействие таких жидкостей с материалом скелета приводят к измерению свойств жидкости (например, к ее вязкости) либо пористой среде [1]. Данные эффекты взаимодействия приводят к фильтрационным аномалиям и в данном случае речь идет не о фильтрации неньютоновской жидкости, а об аномальном проявлении системы жидкости «пористая среда».

В середине прошлого века был открыт линейный закон фильтрации известным французским гидравликом Дарси на основании проведенных им опытов [2]. Он устанавливает связь векторов скорости фильтрации \vec{v} и градиента давления P (массовая сила не учитываются)

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } P. \quad (1)$$

Закон Дарси был выведен на основе предположения о том, что в пористой среде в поровом пространстве начинает происходить очень медленное движение вязкопластичной жидкости. Данный закон справедлив, только тогда, когда однородная жидкость будет фильтроваться и обладать ньютоновской вязкостью, при этом скорость и градиент давления зачастую очень малы, число Рейнольдса не превышает критическую степень значения, которое теряет силу линейная связь градиента давления и скорости [3].

Если, учитывать формулу М.Д. Миллионщикова, тогда

$$\text{Re} = \frac{\rho v \sqrt{k}}{\mu m \sqrt{m}},$$

то закон Дарси применяем в соотношении структуры пористых сред вплоть до значений $Re = 0,22-0,29$.

В ходе данных исследований представлено [4], то, что возможно отметить верхний и нижний рубеж применимости закона Дарси и надлежащие им 2 ключевые группы факторов.

Верхняя грань обуславливается группой факторов, которые связаны с проявлением инерциальных сил при довольно значительных скоростях фильтрации.

Учет инерционных эффектов приводит к двухчленному закону фильтрации

$$gradP = -\frac{\mu}{k}\vec{v}(1 + \beta v). \quad (2)$$

Нижняя грань определяется проявлением неньютоновских реологических качеств жидкости, её связь с твёрдым скелетом пористой среды при довольно небольших скоростях фильтрации.

Учитывая вышеизложенное данную феноменологическую теорию для фильтрации вязкопластичной жидкости предложил Мирзаджанзаде А.Х., основанную на линейной модели для вязкопластичной сплошной среды. Движения отмеченной сплошной среды описывают следующим законом фильтрации:

$$\begin{aligned} \vec{v} &= -\frac{k}{\mu}\left(1 - \frac{G_0}{|gradP|}\right)gradP, \quad |gradP| > G_0; \\ \vec{v} &= 0, \quad |gradP| \leq G_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Предельные значения G_0 определяет величину градиента давления, по достижении которой начинается движение жидкости; при наименьших значениях градиент движения отсутствует. Его значение определяется соотношением

$$G_0 = \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k}}, \quad (4)$$

где α – некоторая постоянная, k – проницаемость, τ_0 – предельное напряжение

сдвига.

Применимость экспериментально доказана и хорошо изучена в соотношении (3) и достаточна, проста в использовании. И поэтому во многих исследованиях при фильтрации аномальной жидкости используется данный закон фильтрации.

Процесс фильтрации неньютоновских жидкостей в пористой среде совершается последующим способом [4]. В пористой среде, которая состоит из большого количества микрокапилляров разных диаметров, при уменьшении перепада давления наступает градационное «забивание капилляров». Происхождение течения останавливается в наиболее малых капилляров, а по мере понижения давления совершается закупорка всё крупных и крупных капилляров. Чем интенсивнее рассеивание поры, тем больше затянута переключение к совершенному прекращению течения и этим интенсивнее различается подлинный закон фильтрации от соотношения (3). В основе возникновения неньютоновских параметров пластовых концепций, покоятся разные материальные механизмы. Немаловажно, но, то что неньютоновские эффекты выражается при небольших скоростях фильтрации и в средах с небольшой величиной пор, т.е. с наиболее незначительной проницаемостью. Это устанавливает характерные черты неньютоновской фильтрации в разнородных пластах. Области незначительной проницаемости становятся областями максимального проявления неньютоновских эффектов.

Одновременно с изучением фильтрации аномальных жидкостей, большое внимания уделяется особенностям движений полимерных растворов в пористых средах. Их изучение очень важно, как для нефтяной промышленности [5, 6], так и для процессов химических технологий, где эффективность вытеснения нефти водой используется для загущения воды полимерами.

Закон фильтрации для этих жидкостей имеет вид:

$$\text{grad} P = -\frac{\mu}{k} \bar{v} \left(\frac{v}{v_0} \right)^{\frac{1}{n}-1} = -C v^\alpha \frac{\bar{v}}{v}, \quad (5)$$

где C – экспериментальная константа, $n > 0$.

В.В. Сокольский предложил закон, позволяющих изучать фильтрацию грунтовых жидкостей

$$-\frac{k}{\mu} \nabla P = \frac{\bar{v}}{\sqrt{1-c^2 v^2}}, \quad (6)$$

где c – некоторый параметр.

При $c = 0$ имеем закон Дарси, при $c \neq 0$ существует предельная возможная скорость фильтрации $v_{\max} = 1/c$. Она достигается лишь при бесконечно большом градиенте давления.

Уравнение для давления при гибком порядке пласта возможно получить, дополняя закон фильтрации (3) уравнением состояния флюида, уравнением неразрывности и пористой среды.

Итоговое дифференциальное уравнение, определяющее давление для аномальных жидкостей принимает вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \text{div} \left[\left(1 - \frac{G_0}{|\nabla P|} \right) \nabla P \right], \quad |\nabla P| > G_0, \quad (7)$$

где χ – коэффициент пьезопроводности.

Основная модель фильтрации при решении нестационарных задач с предельным градиентом в пласте, который преобразует переменную область фильтрации, граничащую с модулем градиента давления и равной предельному градиенту G_0 , а давление равно начальному пластовому.

Библиографический список

1. Бернадинер М.Г., Ентов В.М. Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей. М.: Наука. 1975.
2. Кочина П.Я. Гидродинамика и теория фильтрации. Избр. тр. М.: Наука, 1991. – 351 с.

3. Алишаев М.Г. О стационарной фильтрации с начальным градиентом. – Теория и практика добычи нефти. Ежегодник. – М.: Недра. – 1968. С. 202-211.
4. Хусаинова Г.Я. Исследование температурных полей при стационарном течении аномальных жидкостей // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 7. С. 13–16.
5. Хусаинова Г.Я. Способ определения начального градиента давления в нефтяных пластах. //Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 9. С. 412-415.

Оригинальность 84%