

## ИЗ ИСТОРИИ МЕХАНИКИ: ФОРМИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОМЕХАНИКИ КАК НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

**Острая О.В.**

**Оренбургский государственный университет, г. Оренбург**

Общеизвестно, 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. [1]

Свойства горной породы (пласта) вмещать и пропускать через себя жидкость (флюид) называются фильтрационно-емкостными свойствами пласта. К этим свойствам относятся: пористость, проницаемость, скорость фильтрации и т.д.

Наука о движении жидкостей, газов и их смесей – флюидов – в пористых и трещиноватых средах называется подземной гидромеханикой.

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.

Значением подземной гидромеханики как важного раздела механики сплошных сред определяется актуальность изучения истории её становления.

Зарождение гидромеханики следует отнести к древности, к моменту, когда люди научились создавать оросительные каналы и водопроводы. В Китае, например, 2500 лет назад был построен Великий канал протяженностью около 1800 км. В древнем Египте и Индии приблизительно в то же время существовали не менее грандиозные для древнего мира гидротехнические сооружения. Первый водопровод появился в Риме 2300 лет назад. [4]

В IV веке до н.э. древнегреческий философ Аристотель (384-322 гг. до н.э.) сделал ряд наблюдений над движением жидкостей. Знаменитый трактат Архимеда (ок. 287-212 гг. до н.э.) «О плавающих телах» следует считать первым научным трудом в области гидромеханики. Следующий шаг в развитии гидромеханики был сделан учеными XV-XVII веков. Здесь необходимо упомянуть Леонардо да Винчи (1452-1519) и его труд «О движении и измерении воды», Симона Стевина (1548-1620) («Начала гидростатики»), Галилео Галилея (1564-1642) («Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и о тех, которые в ней движутся»). Исаак Ньютон (1643-1727) в своем знаменитом труде «Математические начала натуральной философии» установил, основываясь на собственных опытах, что сопротивление движению тел в жидкости пропорционально квадрату их скорости. Блез Паскаль (1623-1662) открыл закон о передаче давления в жидкости, вследствие чего появилось большое число простых гидравлических машин (типа гидравлических прессов,

домкратов и т.д.). Э. Торричелли (1608-1647) получил формулу скорости истечения невязкой жидкости из резервуаров через отверстия. [4]

Однако все перечисленные открытия можно отнести лишь к отдельным разделам гидромеханики. Формирование же гидромеханики как целостной науки стало возможным только после появления фундаментальных научных трудов М.В. Ломоносова, Д. Бернулли и Л. Эйлера.

М.В. Ломоносов (1711-1765) в диссертации «Рассуждение о твердости и жидкости тел» (1760 г.) сформулировал открытые им законы сохранения вещества и энергии. [4]

Даниил Бернулли (1700-1782) вывел важнейшее уравнение взаимосвязи удельных энергий при движении жидкости, служащее основой теоретических построений и практических расчетов в области гидравлики (впоследствии уравнение было названо его именем). В 1738 г. он опубликовал книгу «Гидродинамика, или Записки о силах и движениях жидкостей», где впервые ввел термин «гидромеханика». [4]

Леонард Эйлер (1707-1783) в 1755 г вывел системы дифференциальных уравнений равновесия и движения жидкостей и газов; он указал некоторые интегралы этих уравнений и сформулировал закон сохранения массы применительно к жидкости; предложил конструкцию турбины, написал основополагающие труды по теории корабля. [4]

Теоретической основой подземной гидромеханики является теория фильтрации, описывающая движение флюидов с позиции механики сплошной среды.

Начало систематическому изучению особенностей фильтрации жидкости в пористой среде было положено трудами французского инженера Анри Дарси (1803-1858) в середине XIX века. В то время А. Дарси был мэром города Дижон (Франция) и создавал первую совершенную систему водоснабжения. Он 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. В дальнейшем Дарси занимался экспериментальным изучением движения воды через песчаные фильтры. Результаты опытов и установленные им основной закон фильтрации были опубликованы в 1856 г. [1]

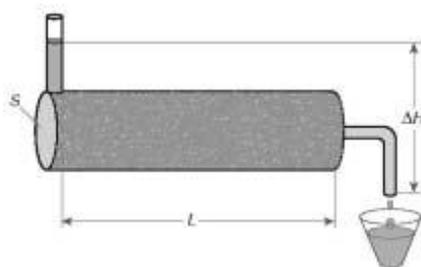


Рисунок 1. Схема опыта Дарси.

В современной трактовке закон Дарси представляется в следующем виде:

$$Q = k \frac{S \Delta H}{L}. \quad (1)$$

Если повторить опыт Дарси с жидкостями различной плотности  $\rho$  и вязкости  $\mu$ , то можно убедиться, что расход пропорционален плотности жидкости и обратно пропорционален ее вязкости. Поэтому формула (1) примет вид

$$Q = \frac{k\rho g S \Delta H}{\mu L}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, являющийся характеристикой пористой среды и не зависящий от размеров образца и свойств жидкости,  $g$  – ускорение силы тяжести. Эта характеристика называется проницаемостью пористой среды, а формула (2) представляет собой современную запись закона Дарси в простейшей форме.

Теоретическое обоснование опытного закона Дарси было выполнено в 1848 и 1863 гг. другим французским ученым, Ж. Дюпюи (1804-1866), который получил формулу для определения объемного расхода (дебита) скважин.

$$Q = \frac{2\pi kh (p_0 - p_{\text{СКВ}})}{\mu \ln(r_0/r_{\text{СКВ}})}, \quad (3)$$

где  $r_{\text{СКВ}}$  – радиус скважины,  $p_{\text{СКВ}}$  – давление в скважине.

Эта формула является важнейшей в гидрогеологии и нефтяном деле. В частности, по ней подсчитывается, каков будет дебит скважины – ее производительность при данном перепаде давления ( $p_0 - p_{\text{СКВ}}$ ). [3]

Проверке и исследованию пределов применимости закона Дарси посвящено значительное число работ отечественных и зарубежных специалистов. В процессе этих исследований показано, что можно выделить верхнюю и нижнюю границы применимости закона Дарси и соответствующие им две основные группы причин.

Верхняя граница определяется группой причин, связанных с проявлением инерционных сил при достаточно высоких скоростях фильтрации.

Нижняя граница определяется проявлением неньютоновских реологических свойств жидкости, ее взаимодействием с твердым скелетом пористой среды при достаточно малых скоростях фильтрации.

Рассмотрим первый из этих предельных случаев, который приводит к нелинейным законам фильтрации.

Наиболее полно изучены отклонения от закона Дарси, вызванные проявлением инерционных сил при увеличении скорости фильтрации. Верхнюю границу применимости закона Дарси связывают обычно с некоторым критическим значением  $Re_{\text{кр}}$  числа Рейнольдса (отношение сил инерции к силам вязкого трения. Названо по имени английского ученого Осборна Рейнольдса (1842-1912)).

$$Re = \frac{wd}{\nu}, \quad (4)$$

где  $d$  – некоторый характерный линейный размер пористой среды,  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости флюида.

Многочисленные экспериментальные исследования и, в частности, опыты Дж. Фэнчера, Дж. Льюиса и К. Бернса, Линдквиста, Г. Ф. Требина, Н. М. Жаворонкова, М.Э. Аэрова и других были направлены на построение универсальной зависимости коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  от числа Рейнольдса. Однако вследствие различной структуры и состава пористых сред получить такую универсальную зависимость не удается.

Первая количественная оценка верхней границы применимости закона Дарси была дана Н.Н. Павловским, который, опираясь на результаты Ч. Сликтера, полученные для модели идеального грунта, и полагая характерный размер  $d$  равным эффективному диаметру  $d_{эф}$ , вывел следующую формулу для числа Рейнольдса

$$Re = \frac{wd_{эф}}{(0,75m + 0,23)v}. \quad (5)$$

Используя эту формулу и данные экспериментов, Н.Н. Павловский (1884-1937) установил, что критическое значение числа Рейнольдса находится в пределах  $7,5 < Re_{кр} < 9$ .

Основываясь на исследованиях многих авторов, В.Н. Щелкачев провел критический анализ и сравнение формул для определения  $Re$  в подземной гидромеханике и оценки возможных критических значений числа Рейнольдса  $Re_{кр}$ , соответствующих верхней границе применимости закона Дарси.

Итак, при значениях числа Рейнольдса  $Re > Re_{кр}$  линейный закон Дарси перестает быть справедливым. Первое обобщение закона Дарси на случай больших  $Re$ , основанное на опытных данных, было выполнено французским ученым Ж. Дюпюи (1804-1866), который сформулировал двучленный закон фильтрации, носящий имя австрийского исследователя Ф. Форхгеймера (1852-1933), установившего его несколько позднее независимо от Дюпюи. В принятых сейчас обозначениях это соотношение можно представить (для простейшего случая прямолинейно-параллельного течения без учета силы тяжести) в следующем виде:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\eta}{k} w + \beta \frac{\rho}{\sqrt{k}} w^2, \quad (6)$$

где  $\beta$  – дополнительная константа пористой среды, определяемая экспериментально. [3]

Первое слагаемое в правой части (6) учитывает потери давления вследствие вязкости жидкости, второе – инерционную составляющую сопротивления движению жидкости, связанную с криволинейностью и извилистостью поровых каналов. Из (6) следует, что при малых скоростях фильтрации квадратом скорости  $w^2$  можно пренебречь, и градиент давления будет зависеть только от первого слагаемого, т.е. движение будет безынерционным, соответствующим закону Дарси. При больших скоростях фильтрации силы инерции становятся существенными и будут сопоставимы или даже преобладать над силами вязкости. [3]

Хорошая согласованность соотношения (6) с данными промысловых и экспериментальных наблюдений была установлена в многочисленных работах советских и зарубежных исследователей. Это свидетельствует о том, что данное соотношение представляет нечто большее, чем простую эмпирическую формулу, поскольку оно хорошо выполняется даже для весьма больших значений скорости фильтрации. Физический смысл этого заключается в том, что при больших скоростях быстропеременное движение в порах вследствие «извилистости» поровых каналов сопряжено с появлением значительных инерционных составляющих гидравлического сопротивления. [3]

#### *Список литературы*

- 1. Багов Р.А. Об основных понятиях теории фильтрации и основных этапах ее развития / Р.А. Багов, Р. Цей // Вестник Адыгейского государственного университета: сетевое электронное научное издание. – 2008. – №1.*
- 2. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1984. – 207с.*
- 3. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – М.: Недра, 1993. – 416 с.*
- 4. Винников В.А., Каркашадзе Г.Г. Гидромеханика: учебник для вузов. – Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 302 с.*
- 5. Чарный, И.А. Подземная гидромеханика / И. А. Чарный. – М.: ОГИЗ Гостехиздат, 1948. – 196 с.*