Параметры, описывающие накопление и перенос жидкости в пористой среде

Пористость

- Важной характеристикой пористой среды является *пористость* (или *порозность*) m, равная относительной объемной доле порового пространства в материале. Пористость определяет количество жидкости, которое может содержаться в некотором объеме пористой среды (если жидкость целиком заполняет внутрипоровое пространство). Если для образца однородного пористого материала объемом V объем пор составляет Vп, то пористость этого образца m = Vп/V .

- Пористость, очевидно, является безразмерной величиной, значения которой лежат в интервале $0 < m < 1$. Для ориентировки укажем, что пористость почв лежит в диапазоне 0,3 – 0,7, речного песка — 0,3 – 0,55, нефтегазоносных пластов, встречающихся на практике, — 0,1 – 0,
- Для неоднородных пористых сред, свойства которых могут меняться от точки к точке, пористость m будет некоторой функцией пространственных координат. Если пористая среда может деформироваться (это происходит, например, при утрамбовке грунта или изменении давления в жидкости в порах), то величина пористости может меняться и со временем:

  $m = m(x,y,z,t)$.

- Если бы осреднение проводилось по маленькой области с размером Δx ~ d, то значение m, вычисленное по формуле m = Vп/V , испытывало бы существенные колебания с увеличением Δx (качественный вид этой зависимости показан на рис. 2).

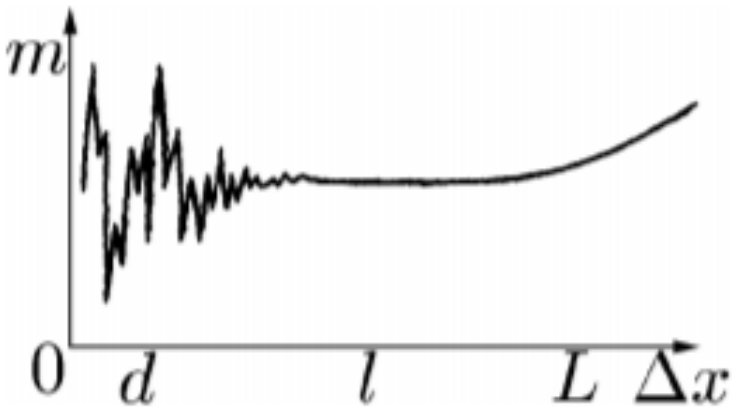

Рис. 2.

О введении характерного размера пор

- По поводу уже упоминавшегося понятия характерного размера пор d сделаем следующее замечание. В реально встречающихся пористых средах размеры неоднородностей (размеры пор, размеры зерен) распределены случайным образом, причем часто бывают ситуации, когда плотность распределения пор по радиусам имеет даже несколько максимумов. Поэтому, строго говоря, введение характерного размера может быть произведено неоднозначно), однако определение такой величины бывает удобно для проведения оценок по порядку при анализе уравнений.

Если сделать мысленный поперечный разрез образца пористой среды, то в образовавшемся сечении (обозначим его площадь S) часть площади Sп будет приходиться на поры, а оставшаяся часть S − Sп — на твердое вещество пористой среды). Отношение n площади пор в сечении к общей площади сечения называется просветностью (поверхностной пористостью): n = Sп/S.

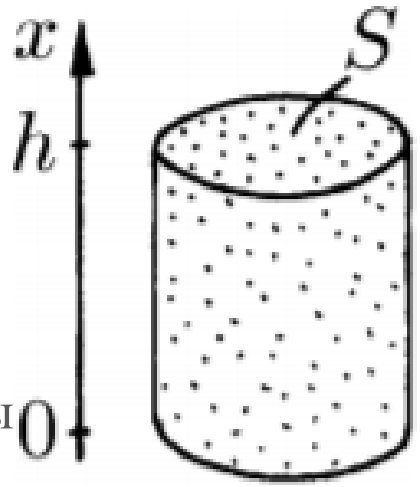

Рис. 3.

Величина просветности зависит от того, через какую точку и в каком направлении проводится разрез среды, однако, что замечательно, среднее значение просветности для большого набора параллельных сечений какого-то фиксированного образца равно пористости этого образца. В самом деле, возьмем цилиндрический образец пористой среды с площадью основания S и высотой h (рис. 3) и осредним по высоте просветности n(x) в поперечных сечениях образца (ось x направлена вдоль образующей цилиндра). В результате для среднего значения просветности получим:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{h}\int_0^h n(x)\,dx = \frac{1}{Sh}\int_0^h Sn(x)\,dx =$$

$$= \frac{1}{Sh}\int_0^h S_{\text{п}}(x)\,dx = \frac{V_{\text{п}}}{V} = m.$$

- Доказанное свойство позволяет приближенно считать пористость и просветность равными величинами для реальных пористых сред со случайной структурой: $m \approx n$. Отметим также, что эта особенность лежит в основе одного из методов измерения пористости)

Об осредненных геометрическ их параметрах

- Обратим внимание, что упоминавшиеся выше геометрические по своей природе параметры (пористость, характерный размер пор, функция распределения пор по радиусам) в общем случае не характеризуют полностью способность пористой среды пропускать через себя жидкость. Например, проницаемую для жидкости пористую среду можно превратить в непроницаемую, если ввести внутри порового пространства некоторое количество тонких перегородок, которые практически не поменяют перечисленные средние характеристики, но существенно изменят проводимость среды.

Скорость фильтрации

- Для характеристики массопереноса при фильтрации жидкости (или газа) вводится векторная величина, называемая скоростью фильтрации. Рассмотрим сначала простейший случай, когда жидкость движется вдоль тонкой прямолинейной трубки, заполненной пористым материалом. Для такого течения скорость фильтрации определяется как вектор u, направленный в сторону движения жидкости, величина которого равна объемному расходу жидкости (объему жидкости, протекающей в единицу времени) в расчете на единицу площади *полного поперечного сечения* трубки (включающего как поры, так и пористую среду).

Здесь важно подчеркнуть, что хотя скорость фильтрации имеет размерность скорости, она тем не менее не равна скорости движения отдельных частиц жидкости. Действительно, если S — площадь поперечного сечения трубки, Sп — часть площади этого сечения, приходящаяся на поры, то постоянство объемного расхода однородной несжимаемой жидкости можно записать в виде

$$Q = |\boldsymbol{u}|S = vS_{\text{п}} = \text{const},$$

где Q — объемный расход жидкости через трубку, v — среднее значение проекции скорости *частиц жидкости* на ось трубки, вычисленное по площади сечения, занимаемой порами. Отсюда получаем

$$v = \frac{|\boldsymbol{u}|S}{S_{\text{п}}} = \frac{|\boldsymbol{u}|}{n} \approx \frac{|\boldsymbol{u}|}{m},$$

т.е. средняя скорость частиц жидкости приблизительно в 1 /m раз больше скорости фильтрации. Например, для речного песка с пористостью m = 0,3 средняя скорость материальных частиц жидкости при их движении внутри пор превышает скорость фильтрации примерно в три раза.

В общем случае неодномерного движения жидкости в пористой среде скорость фильтрации определяется как вектор u, проекция которого на некоторое направление равна объемному расходу жидкости через единичную площадку, перпендикулярную данному направлению. С помощью этого определения легко вычисляются объемный расход Q и массовый расход Qм жидкости через произвольную поверхность Σ, проведенную внутри пористой среды:

$$Q = \int_{\Sigma} \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{n}\, d\sigma, \quad Q_{\text{м}} = \int_{\Sigma} \rho \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{n}\, d\sigma,$$

Где $\rho = \rho(x, y, z, t)$

плотность фильтрующейся жидкости, n — вектор нормали к поверхности Σ.

О моделировани и структуры пористой среды

- Несмотря на то, что поровое пространство реальных сред имеет случайную структуру, качественные (а иногда и количественные) зависимости их фильтрационных свойств от средних геометрических параметров можно получить уже на элементарных геометрических моделях, которые благодаря своей простоте выявляют «физику» происходящих процессов

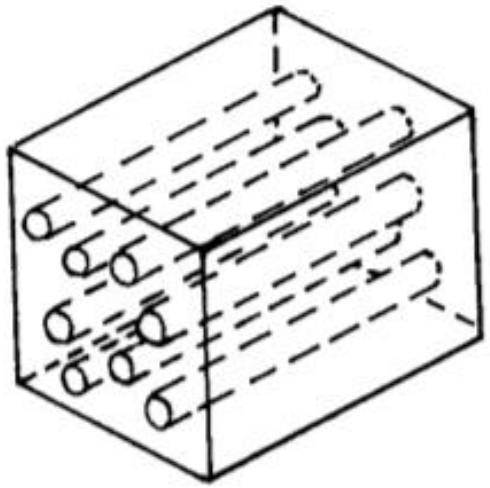

Рис. 4.

- Презентацию подготовил студент 1 курса магистратуры по специальности «Механика и энергетика»:
  Молдагалиев Алибек Талгатович
- 05.04.2020