

ОБ ЭФФЕКТИВНОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАСЫЩЕННОЙ
ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПРИ НАЛИЧИИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ

В. М. Ентов

(Москва)

1°. Рассмотрим однородный фильтрационный поток со скоростью фильтрации u , направленной вдоль оси x . Изменение во времени температурного поля $T(x, t)$ (которое для простоты будем также считать зависящим только от x и t) будет обусловлено двумя процессами — молекулярной теплопроводностью в жидкости и твердом скелете и конвективным переносом тепла вместе с жидкостью. Специфическая особенность конвективного переноса в пористой среде заключается в том, что помимо упорядоченного общего движения жидкости вдоль оси x существует хаотическое поле скорости, своего рода «турбулентность», не меняющаяся во времени, способствующая эффективному перемешиванию жидкости и вследствие этого — значительно ускоряющая все процессы переноса.

Если записать уравнение теплового баланса, пренебрегая разбросом скорости, то получим

$$C \frac{\partial T}{\partial t} + uC_0 \frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{\partial q}{\partial x} \quad (1)$$

где C — теплоемкость единицы объема пористой среды, насыщенной жидкостью; C_0 — теплоемкость единицы объема жидкости; q — тепловой поток. В отсутствие движения тепловой поток обусловлен теплопроводностью

$$q = - \lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

где λ^* — коэффициент теплопроводности пористой среды, насыщенной неподвижной жидкостью.

Если сохранить, как это принято, форму записи уравнений (1) и (2), то при наличии фильтрационного движения эффективный коэффициент теплопроводности λ оказывается функцией скорости фильтрации u . Поиски методов термического воздействия на нефтяной пласт требуют правильной оценки той роли, которую играет теплопроводность (поток q) по сравнению с конвективным переносом с общим потоком жидкости, для чего нужно знать зависимость λ от u . В широком диапазоне скоростей λ линейно возрастает с ростом скорости фильтрации u [1,2]

$$\lambda = \lambda^* + Au \quad (3)$$

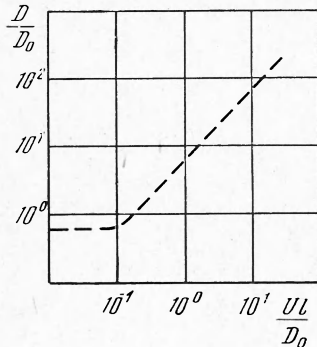
Однако не существует сколько-нибудь надежных данных относительно величины коэффициента A в том диапазоне скоростей, который характерен для нефтепромышленной практики (порядка 10^{-2} см / сек).

С другой стороны, достаточно хорошо исследован процесс диффузии нейтральной примеси («меченых частиц») в пористой среде (см., например, [2,3]). Влияние фильтрационного потока на диффузию оказывается (в практически интересном диапазоне скоростей) чрезвычайно сильным. «Эффективный коэффициент диффузии», определяемый аналогично эффективному коэффициенту теплопроводности, на несколько порядков выше коэффициента молекулярной диффузии. Аналогия процессов теплопроводности и диффузии наводит на мысль, что эффективный коэффициент теплопроводности столь же сильно зависит от скорости фильтрационного движения. Ниже показано, что это не так.

2°. Коэффициент теплопроводности насыщенной пористой среды может зависеть от размерных величин u , l , C_0 , C_1 , λ_0 , λ_1 , ρ и от безразмерных геометрических характеристик среды. Здесь λ_0 и λ_1 — коэффициенты теплопроводности жидкости и вещества твердого скелета, C_0 — объемная теплоемкость жидкости, C_1 — объемная теплоемкость твердого вещества, l — внутренний масштаб пористой среды (например средний радиус пор). В данном случае рассматриваются процессы переноса тепла и не учитывается тепло, возникающее в результате диссипации энергии при движении жидкости. Поэтому в число определяющих параметров не включена вязкость μ . По этой же причине можно размерность тепловой энергии [Q] = кал принять в качестве независимой размерности, не вводя новых размерных постоянных (механического эквивалента теплоты J) (см., например, [4]). Из указанных семи величин и коэффициента теплопроводности λ можно составить четыре безразмерных параметра

$$\frac{\lambda}{\lambda_0}, \quad \frac{ulC_0}{\lambda_0}, \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_0}, \quad \frac{C_1}{C_0}$$

В эти параметры не вошла плотность жидкости как единственная величина, в размерности которой содержится масса. Плотность твердого вещества с самого начала не включена в число определяющих параметров, поскольку теплопроводность внутри твердых зерен не связана с перемещением микро-частиц вещества, а происходит на молекулярном уровне.



Отсюда следует

$$\lambda = \lambda_0 f(u l C_0 / \lambda_0, \lambda_1 / \lambda_0, C_1 / C_0) \quad (4)$$

Линейная зависимость (3), экспериментально наблюдаемая даже при высоких скоростях фильтрации в крупнозернистой среде [1], показывает, что можно ограничиться первым членом разложения функции f в ряд по степеням первого аргумента, так что имеем

$$\lambda = \lambda^* + f_1'(0, \lambda_1 / \lambda_0, C_1 / C_0) u l C_0 \quad (5)$$

Здесь первый член равен коэффициенту теплопроводности пористой среды, насыщенной неподвижной жидкостью, а второй учитывает влияние движения. Движение жидкости, очевидно, увеличивает только теплоперенос в жидкой фазе, составляя теплоперенос в твердой фазе неизменным, или уменьшая его за счет выравнивания температурных перепадов. Поэтому относительное увеличение теплового потока за счет движения будет тем больше, чем меньше собственная теплопроводность твердого скелета, так что

$$\frac{\lambda}{\lambda^*(0, \lambda_1 / \lambda_0, C_1 / C_0)} \leq 1 + \frac{f_1'(0, 0, C_1 / C_0) u l C_0}{\lambda^*(0, 0, C_1 / C_0)}$$

В то же время ясно, что при нулевой теплопроводности скелета его теплоемкость не может влиять на процесс теплопередачи в фильтрационном потоке, так что

$$\lambda / \lambda^*(0, \lambda_1 / \lambda_0, C_1 / C_0) \leq 1 + f_1'(0, 0, 0) u l C_0 / \lambda^*(0, 0, 0) \quad (6)$$

Соотношение (6) показывает, что наибольшее относительное увеличение теплопроводности происходит в том случае, когда твердый скелет не участвует в теплообмене.

Заметим теперь, что процесс теплопроводности в пористой среде с нетеплопроводным скелетом полностью аналогичен (если температурные перепады невелики, так что можно пренебречь изменением свойств среды) процессу распространения нейтральной примеси. Поэтому для оценки производной $f_1'(0, 0, 0)$ можно воспользоваться экспериментальными данными, относящимися к диффузии в пористой среде. На фигуре, взятой из [3], показана зависимость отношения эффективного коэффициента диффузии D к коэффициенту молекулярной диффузии D_0 от параметра $u l / D_0$. Очевидно, тот же график будет представлять зависимость отношения λ / λ_0 от параметра $u l C_0 / \lambda_0$ при $\lambda_1 = 0$.

Из фигуры видно, что в широком диапазоне скоростей фильтрации величина $f_1'(0, 0, 0) \sim 10$. Отсюда следует

$$\lambda \leq \lambda^* + a u l C_0 \quad (a = f_1'(0, 0, 0) \lambda^* / \lambda^*(0, 0, 0)) \quad (7)$$

Здесь a — величина порядка нескольких десятков. При обычных для случая насыщенной жидкостью пористой среды значениях $\lambda^* \sim 10^{-3}$ кал / см сек град, $C_0 \sim 1$ кал / см³ град, $l \sim 10^{-2}$ см, $u_0 \sim 10^{-2}$ см / сек оба члена в (7) одного порядка. Это показывает, что обычные в нефтепромысловой практике фильтрационные потоки не приводят к изменению порядка величины коэффициента теплопроводности, и для них остается справедливым пренебрежение теплопроводностью в направлении движения в сравнении с конвективным переносом, соответствующим среднему движению.

Автор признателен Г. И. Баренблатту и Р. Л. Салганику за обсуждение работы.

Поступила 25V1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Ч уд н о в с к и й А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах. Госэнергоиздат, 1961.
2. Б а н А. и др. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости. Гос-топтехиздат, 1962.
3. К о л л и н з Р. Движение жидкостей через пористые материалы. Изд. «Мир», 1964.
4. Б р и д ж м е н П. Анализ размерностей. Гостехиздат, 1934.