

Е. В. КАРУС, М. Л. СУРГУЧЕВ, О. Л. КУЗНЕЦОВ,
Э. М. СИМКИН, С. А. ЕФИМОВА

ЭФФЕКТ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕПЛОМАССОБМЕН В НАСЫЩЕННЫХ ПОРИСТЫХ И КОЛЛОИДНЫХ СРЕДАХ

(Представлено академиком М. А. Садовским 14 II 1974)

В ряде отраслей науки и техники необходимы средства регулирования тепломассопереносам в гетерогенных средах. Нами исследовалось влияние акустического воздействия на тепломассообмен в капиллярно-пористых и пористых коллоидных средах. Обнаружен эффект интенсификации тепломассообмена в акустическом поле. Ниже описываются результаты исследований и предлагается механизм указанного эффекта.

Эксперименты проводились в два цикла. В первом цикле методом регулярного режима 1 рода измерялась эффективная теплопроводность песчаных образцов, насыщенных различными флюидами при акустическом воздействии и без него. Во втором цикле исследовалось влияние акустического воздействия на эффективную теплопроводность насыщенных пористой и коллоидной сред.

Установка для исследований состояла из трехслойной радиальной модели: пористой (песок) и двух коллоидных (бентонитовая глина) сред, насыщенных соответственно трансформаторным маслом и дистиллированной водой. В указанных средах создавалось определенное температурное поле от источников тепла постоянной мощности с одновременным акустическим воздействием и без него. Затем, в соответствии с данными о распределении стационарного температурного и акустического полей, расчетным путем на ЭВМ БЭСМ-6 определялись теплопроводности сред, соответствующие этим распределениям. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1. Из таблицы следует, что при воздействии акустическим полем в диапазоне частот 10—200 кгц и интенсивностей 0,06—0,25 вт/см² эффективная теплопроводность капиллярно-пористой и коллоидной сред в зависимости от их физических свойств и интенсивности акустического поля увеличивается до 5,5 раз.

Предлагается следующее объяснение механизма указанного явления. Наблюдаемое в экспериментах увеличение эффективной теплопроводности коллоидной среды с практически нулевой проницаемостью (типа глины) можно объяснить тем, что за время выравнивания температур фаз ($\tau_n \sim 10^{-3} - 10^{-1}$ сек.) высокочастотное акустическое поле ($\omega > \tau_n^{-1}$) вызывает многократное внутрипоровое перемешивание жидкости (газа), увеличивая теплообмен в среде. Градиент давления акустического поля в проницаемой капиллярно-пористой среде создает направленный перенос частиц жидкости или газа («звуковой ветер»), что при наличии градиента теплового поля приводит к смещению температурного распределения в сторону распространения волны. Для каждого сечения среды рост эффективной теплопроводности зависит от направления градиентов теплового и акустического полей. Для проницаемых капиллярно-пористых сред, наряду с описан-

ным эффектом внутривязкого перемешивания и фильтрации жидкости (газа), добавляется процесс межпорного перемешивания, который вызывает дополнительный перенос тепла и не зависит от направления градиента акустического поля. Однако осуществление молярного переноса реальных жидкостей (газов) в порах градиентом акустического давления происходит за время релаксации τ (вязкоинерционной).

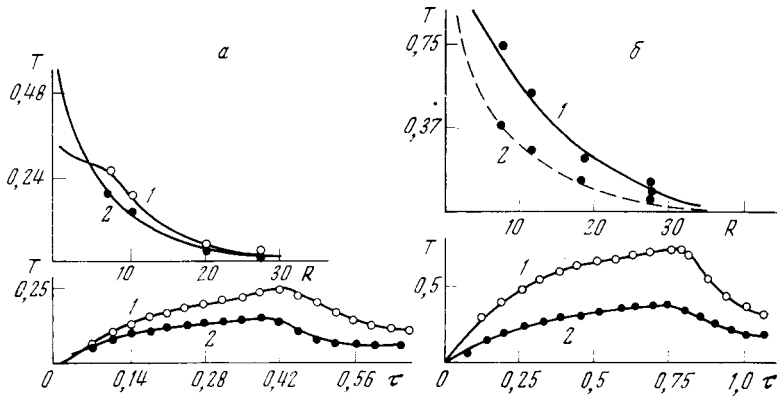


Рис. 1. Зависимость безразмерной температуры T от безразмерных радиуса R и времени τ в коллоидной среде (а) и в капиллярно-пористой среде (песок, насыщенный трансформаторным маслом) (б): 1 — нагрев совместно с акустическим воздействием, 2 — обычный нагрев

В высокочастотных акустических полях соотношение между обратным временем релаксации τ^{-1} и частотой акустического поля ω определяет характер движения жидкости (газа) в порах ($\tau_n^{-1} < \omega < \tau^{-1}$).

С учетом этих представлений система уравнений для описания процесса тепломассопереноса в насыщенных пористых и коллоидных средах в аку-

Таблица 1

Среда, насыщающий флюид и степень насыщения	Пористость среды, %	Интенсивность акустического излучения, вт/см^2	Эф. теплопроводность, $\text{ккал/м}\cdot\text{час}\cdot^\circ\text{C}$		Относительное увеличение эффективной теплопроводности
			без акустич. воздействия	с акустич. воздействием	
Песок с 60% дистиллированной водой и 40% воздуха	39,5	0,1	1,7	1,91	1,12
Песок со 100% дистиллированной водой	39,5	0,1	1,7	2,11	1,24
Песок с 23% маловязкой нефти и 77% воздуха	35	0,1	0,87	0,93	1,07
Песок со 100% высоковязкой нефти	35	0,1	0,87	1,11	1,27
Песок с 17% высоковязкой нефти и 83% воздуха	35,2	0,1	0,7	0,902	1,29
Песок со 100% высоковязкой нефти	35,2	0,1	0,7	0,91	1,3
Песок со 100% воздуха	34	0,1	0,24	0,31	1,29
Песок со 100% трансформаторного масла	34	0,138—0,24	1,98	2,42—5,85	2,62—5,37
Бентонитовая глина с 15,6% дистиллированной водой	5	1,13—0,24	0,498	0,63—1,42	1,27—2,85

стическом поле имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad } T = \text{div} \cdot (a \text{ grad } T),$$

$$\mathbf{v} = -\frac{k}{\mu} \cdot \text{grad } P(r),$$

$$a = \frac{(1-m)\lambda_2 + m\lambda_{1\text{отк}}}{c}, \quad c = (1-m)\rho_2 c_2 + m\rho_1 c_1, \quad (1)$$

$$\lambda_{1\text{отк}} = \lambda_1 + c_1 \rho_1 \cdot \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} \rho_1 \text{div} (m(w-u)) dt \cdot \frac{dl}{T_0} / \left[\rho_1 + \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} \rho_1 \text{div} (m(w-u)) dt \right];$$

здесь P — акустическое давление, которое, например, для цилиндрического типа волн в насыщающей среде имеет вид

$$P(r) = P_0 \frac{e^{-\alpha(r-r_0)}}{(r/r_0)^n}, \quad (2)$$

где P_0 — давление у стенки источника радиуса r_0 , α — декремент затухания в среде, $n=0,5$ — показатель расхождения фронта; T — температура, t — время, v — скорость массопереноса, ρ_1 и ρ_2 — плотности насыщающей и вмещающей сред соответственно, c_1 и c_2 — теплоемкости насыщающей и вмещающей сред соответственно, k — коэффициент проницаемости; μ — вязкость насыщающего флюида, m — пористость, a — температуропроводность среды, λ_1 — теплопроводность насыщающей среды в закрытых порах, которая при акустическом воздействии увеличивается вследствие перемешивания, λ_2 — теплопроводность вмещающей среды, l — длина «заброса» при сжатии жидкости, w , u — колебательные скорости жидкости и скелета, d — диаметр поры.

При выводе этого уравнения принималось, что: 1) теплообмен между вмещающей и насыщающей средами происходит не мгновенно, 2) количество тепла, выделяющегося за счет поглощения акустической энергии, пренебрежимо мало по сравнению с количеством тепла от нагревателя, 3) массопереносом под действием градиента температуры и гравитации можно пренебречь, 4) фильтрация насыщающей среды в порах происходит в соответствии с законом Дарси, в котором в случае перемешивающего движения μ можно заменить $F(x) \cdot \mu$ (4). Расчет на ЭВМ системы уравнений (1) при граничных условиях 2 рода для акустического давления, взятого из (2), показал хорошее согласие с экспериментальным распределением температурного поля, что подтверждает приведенный механизм явления (рис. 1).

Всесоюзный научно-исследовательский институт
ядерной геофизики и геохимии

Поступило
7 I 1974

Всесоюзный нефтегазовый научно-исследовательский
институт
Москва

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ О. Л. Кузнецов, Л. А. Сергеев, Э. М. Симкин, Прикл. мех. и техн. физ., № 3, 150 (1968). ² А. Ф. Чудновский, Теплообмен в дисперсных средах, 1954. ³ В. Н. Николаевский и др., Механика насыщенных пористых сред, 1970. ⁴ M. A. Biot, J. Acoust. Soc. Am., v. 28, 179 (1956).