

ЛИТЕРАТУРА

1. Fogg P., Hanks P., Lambert J. Ultrasonic dispersion in halo — methane vapours. Proc. Roy. Soc., 1953, vol. 219, p. 490.
2. Rossing T. D., Legvold S. Collision excitation of molecular vibrations in halogen — substituted methanes. I. Chem. Phys., 1955, vol. 23, p. 1118.
3. Комаров С. Г., Соловьев А. Н., Шелудяков Е. П. Скорость звука во фреонах на линии насыщения. ПМТФ, 1967, № 5.
4. Шелудяков Е. П., Комаров С. Г., Колотов Я. Л., Соловьев А. Н. Экспериментальное исследование скорости звука в парах и жидкостях. В кн.: Исследования теплофизических свойств веществ, Новосибирск, изд-во «Наука», 1967, стр. 159—181.
5. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., изд-во иностр. лит., 1957.
6. Варафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В НАСЫЩЕННЫХ ПЕСКАХ

О. Л. Кузнецов, Л. А. Сергеев, Э. М. Симкин

(Москва)

Возникновение течения жидкости (газа) в пористых средах под действием звукового поля обсуждалось в физической и технической литературе. В частности, в работе [1] вводится понятие динамической плотности агрегата, возникающей из-за относительного перемещения жидкостей (газов) и твердой фазы и вызывающей вязко-инерционную дисперсию и затухание звука.

Кроме того, рядом исследователей экспериментально показана эффективность воздействия звукового поля и вибрационных колебаний на интенсификацию тепло- и массообмена в жидкостях и газах [2].

Целью настоящей работы было экспериментальное изучение влияния звуковых волн (12—100 кГц) на изменение коэффициента эффективной теплопроводности песков, насыщенных дегазированными нефтями, дистиллированной водой или воздухом.

Образцы готовились из кварцевого песка (в дальнейшем (0)) со средней окатанностью зерен диаметром 0.16—0.25 мм.

Песок насыщался высоковязкой, тяжелой нефтью (1) из месторождения Павлова гора, маловязкой легкой нефтью (2) из месторождения Зыря, или дистиллированной водой (3). Одна серия опытов проводилась с воздухом насыщенным песком.

Приведены физические свойства насыщающих жидкостей и газа (при 20° С): плотность ρ , вязкость μ , скорость звука c , теплоемкость C_p .

	ρ , г/см ³	μ , спз	c , м/сек	C_p , ккал/кг·град
Тяжелая нефть (1)	0.949	540	1475	0.5
Легкая нефть (2)	0.872	9	1360	0.5
Вода (3)	1.0	1.002	1490	1.9
Воздух (4)	0.0012	0.00018	330	0.27

В табл. 1 дана характеристика исследованных образцов, диаметром 50 мм и высотой 70 мм, где δ — вес компоненты смеси, η — пористость, S — степень насыщения жидкостью (газом).

Таблица 1

Компоненты смеси	δ_0 , г	δ_{1-4} , г	δ , г	η , %	S , % жидкостью	S , % воздухом
(0)+(3)+(4)	214.3	32.0	246.8	39.5	60	40
(0)+(3)	214.3	53.4	267.7	39.5	100	0
(0)+(2)+(4)	231.0	9.59	240.6	35.0	23	77
(0)+(2)	231.0	47.0	278.0	35.0	100	0
(0)+(1)+(4)	230.0	7.64	237.6	35.2	17	83
(0)+(1)	230.0	47.3	277.3	35.2	100	0
(0)+(4)	234.5	—	234.5	34.0	100	0

В схему установки для изучения влияния звукового поля на тепловые свойства насыщенных песков (фиг. 1) входили: калориметр 8 с образцом, хромельалюмелевая термопара 3, электронный автоматический потенциометр 6 типа ЭПП-0,7 для записи температуры, термостат 7 типа ТС-15, сосуд Дьюара 9, генератор 4 и осциллограф 5 импульсной переносной аппаратуры ИПА-59, излучатель 1 и приемник 2 упругих волн.

Излучателем и приемником ультразвуковых колебаний служили пьезоэлементы — диски из цирконата титаната свинца ЦТС-19, прижимавшиеся к нижнему и верхнему торцам стаканчика с образцом.

Для получения в процессе экспериментов колебаний с различной преобладающей частотой использовались пьезоэлементы различной толщины (1, 5, 10 мм). Генератор возбуждал электрические импульсы прямоугольной формы с частотой следования 25 имп/сек и длительностью от 5 до 30 мкс/сек. Эти импульсы подавались на пьезоэлементы при напряжении на выходе генератора 1600 в.

Теплопроводность образцов определялась методом регулярного режима первого рода [3].

Калориметр, после заполнения его испытуемым образцом и ввода спая термопары в центр образца подогревался до температуры 45—50° С. Затем он охлаждался в течение 15—30 мин. в термостате с одновременной записью изменения температуры во времени.

Аналогичные опыты проводились с теми же образцами при наложении звукового поля; при этом генератор возбуждающих импульсов включался с момента помещения калориметра в термостат.

Одновременно на экране осциллографа фотографировалась волновая картина, т. е. момент посылки, момент прихода и форма ультразвукового импульса, прошедшего через образец. Предварительно калориметр с образцом и термопарой теплоизолировался и при помощи упомянутой выше акустической аппаратуры в течение трех часов подвергался воздействию звукового поля. Одновременно осуществлялась запись температуры. Возрастания температуры не наблюдалось (при точности отсчета температуры на ленте потенциометра 0,3° С). Таким образом влиянием затухания волн в образце на изменение его температуры можно было пренебречь.

В табл. 2 помещены полученные экспериментальные и расчетные данные, где k_0 , k — коэффициенты теплопроводности среды без воздействия и под воздействием звукового поля, λ — длина падающей волны, f — частота звукового поля, H/λ — волновая толщина образца. Известно [4], что эффективная теплопроводность насыщенной пористой среды (без воздействия упругих волн) определяется, при наличии градиента температуры, теплопроводностью скелета породы и насыщающей неподвижной жидкости (газа).

Таблица 2

Компоненты	C_p , ккал/кг·град	ρ , кг/м ³	k_0, k , ккал/м·час·град	λ , см	$\frac{H}{\lambda}$	f , сек ⁻¹ ·10 ³	c , м/сек
(0)+(3)+(4)	0.295	1843	1.7 1.9				
(0)+(3)	0.351	2000	1.7 2.1	2.3	3.2	20	470
(0)+(2)+(4)	0.202	1798	0.87 0.93				
(0)+(2)	0.242	2077	0.87 1.1	2.4	2.9	14	456
(0)+(1)+(4)	0.200	1776	0.7 0.9				
(0)+(1)	0.243	2072	0.7 0.9	4.8	1.45	14	568
(0)+(4)	0.19	1751	0.24 0.31	2.0	3.5	19.2	474

При наложении звукового поля, вызывающего внутрипоровое перемещение жидкости, перенос тепла происходит не только за счет теплопроводности, но и за счет массопереноса, т. е. вынужденной внутрипоровой конвекции.

В этом случае коэффициент эффективной теплопроводности зависит от удельного сопротивления пористой среды внутрипоровому перемещению данного флюида (фильтрационного сопротивления), его теплоемкости и плотности, а также от теплопроводности скелета породы. При этом с увеличением теплосодержания единицы объема теплоперенос из-за вынужденной конвекции и, следовательно, эффективная теплопроводность возрастают, а с увеличением фильтрационного сопротивления — уменьшаются.

Введем безразмерную величину z , характеризующую отношение переноса тепла путем вынужденной конвекции в насыщенной пористой среде под действием звука к теплопереносу путем теплопроводности без звукового поля.

$$z = \frac{C_p \rho \eta V (T_2 - T_1)}{k_0 (T_2 - T_1)} = \frac{C_p \rho \eta V}{k_0} \left(V = \frac{\text{grad } p}{\sigma} \right) \quad (2.5)$$

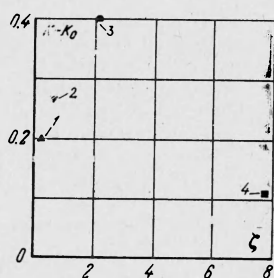
Здесь $\text{grad } p$ — градиент того давления, которое возникает в звуковом поле и вызывает звуковой ветер¹, т. е. перетекание жидкости (газа) в направлении распространения звуковой волны. При обработке экспериментальных данных величину $\text{grad } p$ для исследовавшихся образцов принимали постоянной.

V — скорость фильтрации, вызванная звуковым ветром, σ — удельное сопротивление пористой среды внутрипоровому перетоку жидкости.

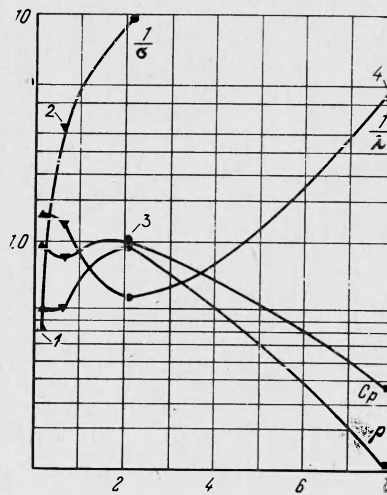
Для оценки величины σ в случае насыщенной пористой среды с зернами одинакового диаметра d Хурстом и Мартином [6] была предложена экспериментальная формула

$$\sigma = \frac{1}{0.12 \eta d} (2 \rho \omega)^{1/2} \quad (2.6)$$

где ω — угловая частота колебаний.



Фиг. 2



Фиг. 3

На фиг. 2 представлена зависимость абсолютного прироста коэффициентов эффективной теплопроводности исследованных сред без воздействия и при воздействии звукового поля от комплекса $z / \text{grad } p$.

Обнаружено увеличение эффективной теплопроводности при воздействии звукового поля для всех исследовавшихся сред. Абсолютное значение прироста $(k - k_0)$ теплопереноса оказалось максимальным в водонасыщенном песке, а минимальным — в газонасыщенном. На фиг. 3 показано влияние каждого из параметров на величину $z / \text{grad } p$ для всех исследовавшихся сред.

Как видно из фиг. 2 и 3, минимальное увеличение коэффициента эффективной теплопроводности для газонасыщенного песка объясняется ничтожно малым значением теплоемкости C_p единицы объема воздуха по сравнению с водой и нефтью.

Максимальное увеличение коэффициента эффективной теплопроводности для водонасыщенного песка, видимо, связано с наибольшими значениями для воды величин C_p и при достаточно малом значении удельного сопротивления σ внутрипоровому перетоку жидкости (фильтрационного сопротивления).

Поступила 1 III 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеров В. С. Вязко-инерционная дисперсия и затухание звука в суспензии высокой концентрации. Акуст. ж., 1959, т. 5, вып. 3.
2. Кубанский П. И. Интенсификация теплообмена акустическими течениями при вынужденной конвекции. Акуст. ж., 1962, т. 8, вып. 1.
3. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. Машгиз, 1957.
4. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., Физматгиз, 1962.
5. Nolle A. W. et. al. Acoustical properties of water filled sands. J. Acoust. Soc. Amer., 1963, vol. 35, No 9.

¹ См. Ю. Т. Статников. Исследование акустических течений. Канд. дисс. 1967, Фонды Акустического института АН СССР.