АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2004, том 50, № 2, с. 283–285

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.22:665.61

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЯХ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ

© 2004 г. А. С. Магомадов

Кубанский государственный технологический университет
350042 г. Краснодар, ул. Московская 2-А
E-mail: magomadovas@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2003 г.

Известно, что звуковые колебания находят все большее применение при интенсификации массообменных процессов, процессов горения, сепарации и осаждения, в измерительной технике и т.д. [1]. Сами же данные о скорости ультразвука в веществах дают дополнительную информацию об их термодинамических свойствах. Совместная обработка данных о термических свойствах веществ с данными о скорости ультразвука позволяет определять их термодинамические свойства [2]. Это, несомненно, повышает надежность исследований. Исследование скорости распространения ультразвука в веществах в широком интервале параметров состояния, в комплексе с другими теплофизическими свойствами позволяет также разрабатывать новые подходы для прогнозирования теплофизических свойств [3, 4].

Проблема разработки месторождений тяжелых высоковязких нефтей (ВВН) термическими методами выдвинула задачу расчета тепло- и массообменных процессов дисперсных потоков в нефтяных пластах. Это в свою очередь требует прогнозирования эффективных теплофизических свойств пластовых флюидов – нефтей и их водных эмульсий.

Для исследования скорости ультразвука в ВВН была создана установка, позволяющая производить измерения в интервале температуры от 20 до 200°С и давления от 0.1 до 60 МПа [4].

Принципиальная блок-схема установки приведена на рис. 1. С генератора импульсов *2* прямоугольный импульс длительностью примерно в один полупериод волны резонансной частоты датчиков подается на излучатель "И". В результате ударного действия электрического импульса излучатель возбуждается и в виде затухающего импульса передает колебания приемнику "П". Форму импульса можно наблюдать на экране осциллографа *5*. Осциллограф синхронизируется генератором импульса *2*. В свою очередь, генератор *2* возбуждается звуковым генератором *3*, частота которого контролируется электронно-счетным частотомером *4*.

При изменении частоты следования импульсов с помощью генератора 3 и при достижении величины, обратной удвоенному времени распространения импульса, на участке "*l*" происходит наложение импульса прямого прохождения и двукратно отраженного. В этом случае на экране осциллографа наблюдается резонансный всплеск напряжения импульса.

Формула для расчета скорости звука имеет простой вид

$$c = 2lf, \tag{1}$$

где c – скорость распространения звука; l – расстояние между излучателем и приемником; f – частота следования импульсов.

В качестве излучателя использованы кварцевые пластины диаметром 20 мм с резонансной частотой $f = 1$ МГц.

Термостатирование автоклава с измерительной ячейкой осуществлялось в специальном термостате. Измерение температуры проводили с помощью платинового термометра с погрешностью ±0.05°С.

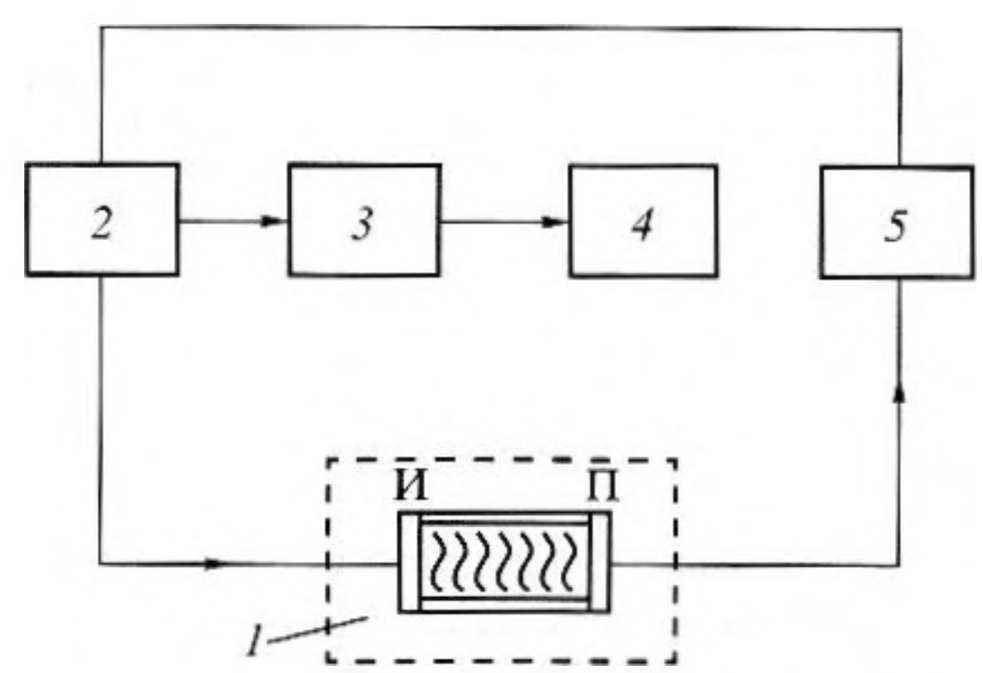

Рис. 1. Электронная блок-схема установки для измерения скорости ультразвука в жидкости: *1* – измерительная ячейка; *2* – генератор импульсов; *3* – звуковой генератор; *4* – электронно-счетный частотомер; *5* – осциллограф.

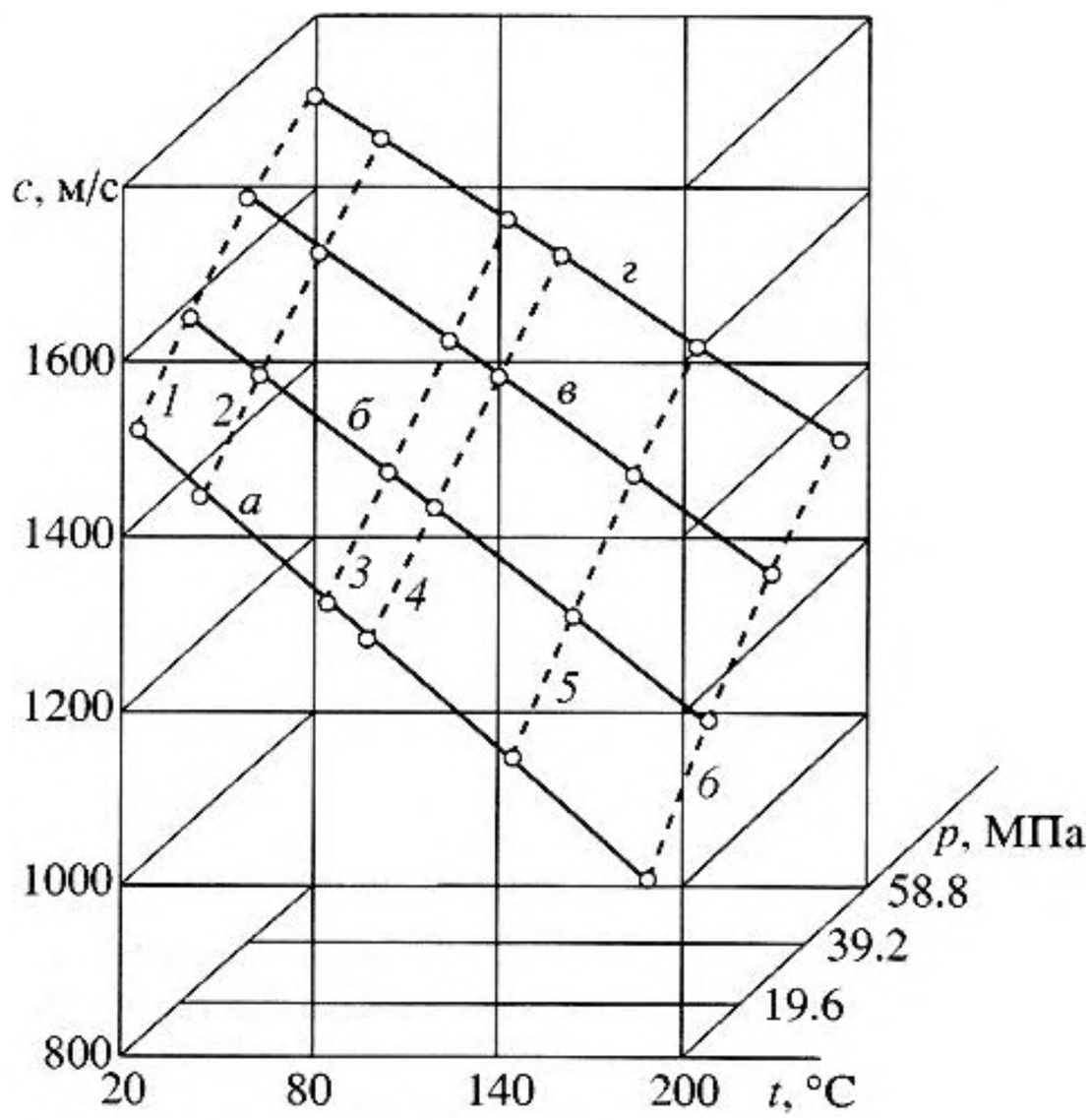

Рис. 2. Зависимость скорости распространения ультразвука в ВВН месторождения Зыбза–Глубокий Яр (Скв. № 304) от температуры и давления. Изобары: *а* – 0.098 МПа; *б* – 19.6 МПа; *в* – 39.7 МПа; *г* – 58.8 Мпа. Изотермы: *1* – 21.0°С; *2* – 43.3°С; *3* – 82.7°С; *4* – 99.7°С; *5* – 145.0°С; *6* – 190.0°С.

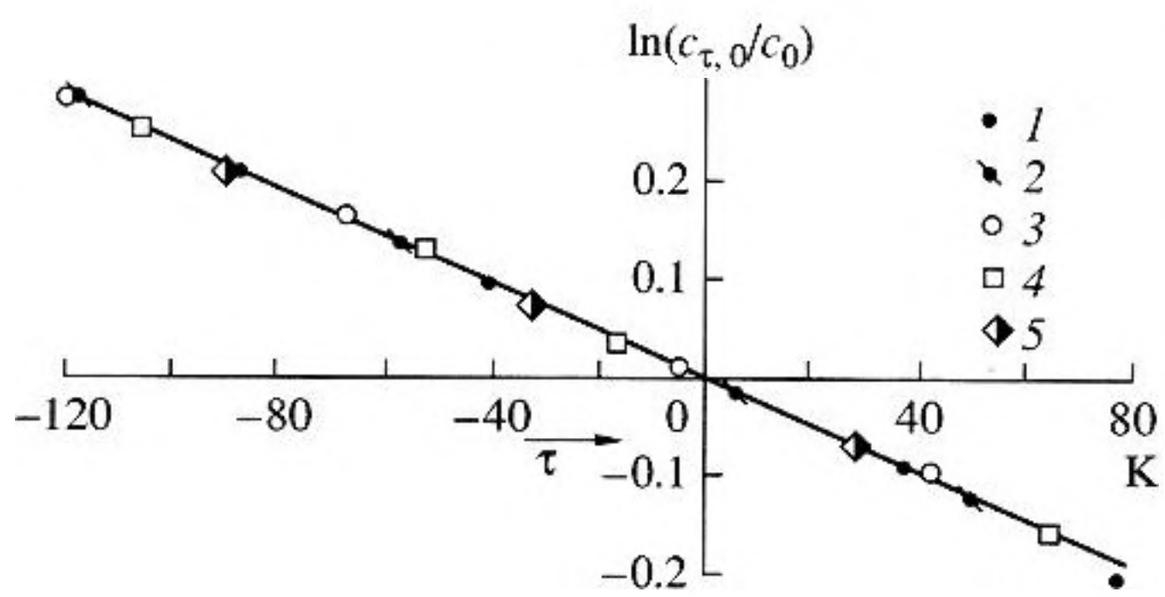

Рис. 3. Зависимость скорости ультразвука ВВН в приведенных координатах на критической изобаре: *1*, *2*, *3* – Зыбза–Глубокий Яр (Скв. № 688, 304, 849); *4* – Каражанбас (Скв. № 2); *5* – Русское (Скв. № 42).

Давление в автоклаве создавалось и измерялось грузопоршневым манометром типа МП–600 класса точности 0.05.

Относительная погрешность измерения скорости ультразвука в ВВН на описанной выше установке при надежности равной 0.95 в среднем не превышала ±0.1%. Это подтверждалось тарировочными опытами на дистиллированной воде и чистых углеводородах при различных параметрах состояния.

Всего было исследовано 12 образцов ВВН различных месторождений России и Казахстана. Физико-химические свойства исследованных нефтей приведены в работе [5]. В качестве примера на рис. 2 представлена зависимость скорости ультразвука в ВВН месторождения Зыбза–Глубокий Яр (Скв. № 304) от температуры и давления. На графике рисунка видно, что темп изменения скорости ультразвука ВВН от давления при высоких температурах увеличивается. Аналогичные зависимости наблюдаются и для других исследованных ВВН.

Для математической обработки данных о скорости ультразвука в нефтях воспользовались результатами, приведенных в [6]. В указанной работе для описания и разработки методик расчета теплофизических свойств смесей углеводородов были использованы элементы теории информации и методы термодинамического подобия свойств веществ. Применительно к описанию скорости ультразвука в ВВН уравнение, полученное в работе [6], запишется в виде

$$c_{\tau,\pi} = c_0 \exp[c_1(\tau) + c_2(\tau, \pi)], \qquad (2)$$

где c_0 – значение скорости ультразвука (в м/с) в нефти при фиксированных температуре $T = 0.45T_{кр}$ (в К) и давлении $p = p_{кр}$ (в Па); $c_1(\tau)$ – функция, зависящая только от приведенной температуры $\tau = T - 0.45T_{кр}$ на критической изобаре $p = p_{кр}$; $c_2(\tau, \pi)$ – функция, зависящая от τ и $\pi = p_{кр}$.

В формуле (2) псевдокритические температура $T_{кр}$ и давление $p_{кр}$ рассчитываются по методике, описанной в работе [5].

Величины c_0 для исследованных нефтей определялись путем экстраполяции экспериментальных данных о скорости звука. В случае отсутствия указанных данных c_0 может быть получено с использованием уравнения

$$c_0 = AT_{hp}^{\alpha} p_h^{\beta} \mu^{\gamma}, \qquad (3)$$

где μ – молярная масса нефти;

$$A = 13999.5; \quad \alpha = -0.747510; \quad \beta = 0.454857;$$
$$\gamma = -1.787843 \times 10^{-2}.$$

Средняя относительная погрешность расчета c_0 по уравнению (3) при надежности 0.95 составила ±0.16%, максимальная – –0.41%.

Функция $c_1(\tau)$ в уравнении (2) получена в результате обработки экспериментальных данных о скорости ультразвука ВВН на псевдокритической изобаре и описывается уравнением вида

$$c_1(\tau) = -0.00246609\tau - 8.437174 \times 10^{-7}\tau^2. \qquad (4)$$

На рис. 3 представлен график, подтверждающий справедливость уравнения (4). Функция $c_1(\tau)$ на этом графике представлена в виде выражения

$\ln\frac{c_{\tau,0}}{c_0}$, в котором $c_{\tau,0}$ – значения скорости ультразвука ВВН на псевдокритической изобаре.

Для нахождения функции $c_2(\tau, \pi)$ экспериментальные данные были обработаны в координатах $\ln\frac{c_{\tau,\pi}}{c_{\tau,0}} - \pi$. В этом выражении $c_{\tau,\pi}$ – значение скорости ультразвука в зависимости от приведенной температуры τ и приведенного давления π. Указанная выше функция $c_2(\tau, \pi) = \ln\frac{c_{\tau,\pi}}{c_{\tau,0}}$ описывается уравнением вида

$$c_2(\tau, \pi) = M\pi + L\pi^2, \quad (5)$$

где M и L – величины, зависящие от приведенной температуры τ.

Величина M описывается уравнением вида

$$M = F_0 + F_1\tau + F_2\tau^2, \quad (6)$$

в котором

$$F_0 = 0.00493874; \quad F_1 = 2.482396 \times 10^{-5};$$
$$F_2 = 3.464068 \times 10^{-8}.$$

Величина L также описывается уравнением вида

$$L = J_0 + J_1\tau + J_2\tau^2, \quad (7)$$

в котором

$$J_0 = -2.111854 \times 10^{-5}; \quad J_1 = -1.768529 \times 10^{-7};$$
$$J_2 = -4.195657 \times 10^{-10}.$$

Приведенные выше уравнения (2)–(7) позволяют определять скорость ультразвука в исследованных ВВН при надежности 0.95 со средней погрешностью ±0.22%, максимальная – +0.57%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И.П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
2. *Ноздрев В.Ф.* Применение ультраакустики в молекулярной физике. М.: Госиздат. физико-мат. лит., 1958. 456 с.
3. *Бадмаев Б.Б., Дамдинов Б.Б.* Исследование вязкоупругих свойств органических жидкостей акустическим методом // Акуст. журн., 2000. Т. 47. № 4. С. 561–563.
4. Исследование скорости распространения ультразвука в вязких нефтях и битумах // Ультразвук и термодинамические свойства веществ. О.Ф. Сусеков и др. Курск: Изд-во Курского пед. ин-та, 1984. С. 164–192.
5. *Магомадов А.С., Санжаровский И.Ю.* Математическая модель эффективных коэффициентов переноса углеводородов и их природных смесей // Труды XIII Школы-семинара "Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках". СПб., 2001. Т. 2. С. 276–279.
6. *Магомадов А.С.* Теплофизические свойства высоковязких нефтей // Краснодар: Изд. КубГТУ, 2000. 118 с.