

УДК 539.3 + 552.08

**ОЦЕНКА РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПЛАСТОВ  
БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ПО ДАННЫМ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

**Л. А. Назарова<sup>1,2</sup>, Л. А. Назаров<sup>1,3</sup>, Н. А. Голиков<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: larisa@misd.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
просп. Карла Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия*

<sup>4</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Проведены термобарические испытания цилиндрических образцов баженинов: при постоянной осевой нагрузке и переменной температуре  $T$  регистрировалось изменение высоты со временем  $h(t)$ . Показано, что при быстром возрастании/убывании  $T$  деформирование происходит по термоупругому закону, рассчитан коэффициент линейного температурного расширения. При постоянной повышенной температуре процесс деформирования описывается вязкоупругой моделью Фойгта. Сформулирована и решена обратная задача определения упругих модулей и вязкости пород по  $h(t)$ .

*Порода-коллектор, баженовская свита, эксперимент, напряжение, температура, модуль Юнга, вязкость, коэффициент линейного расширения, обратная задача*

В структуре запасов углеводородов России половину из них составляют трудноизвлекаемые ресурсы [1], к которым относятся и нефти баженовской свиты. Одним из эффективных методов извлечения тяжелых и высоковязких нефтей, а также разработки битумов является тепловое воздействие [2–4], которое наряду с положительным (резкое снижение вязкости флюидов [5]) может иметь и отрицательный эффект (падение проницаемости коллектора [6]). Последний обусловлен уменьшением упругих модулей пород с ростом температуры [7, 8], что при неизменном внешнем поле сжимающих напряжений в массиве приводит к увеличению деформаций и, следовательно, к сужению фильтрационных каналов. Коллекторы нетрадиционного типа, к которым относятся нефтесодержащие породы баженовской свиты, образованы из карбонатно-кремнисто-глинистого материала, содержание органического вещества в котором превышает 10% [9], поэтому описанный механизм может реализовываться уже при температурах, ненамного превышающих пластовую (120–130°C [10]). Для оценки вызванных тепловым воздействием изменений фильтрационно-емкостных характеристик коллекторов такого типа

необходимо знать теплофизические и реологические свойства слагающих их пород. В настоящей статье предложен и апробирован метод, позволяющий определить коэффициент линейного температурного расширения, модуль Юнга и вязкость по данным термобарических испытаний цилиндрических образцов.

#### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Эксперименты проводились на цилиндрических образцах (высота 38 мм, диаметр 28 мм) битуминизированного аргиллита, отобранного из баженовской свиты Салымского месторождения Западной Сибири. Образец устанавливался на нижний пуансон и помещался в трубчатую печь, подключенную к блоку регулировки температуры (рис. 1). Постоянная осевая нагрузка создавалась грузом (масса  $M = 23$  кг) через верхний пуансон.

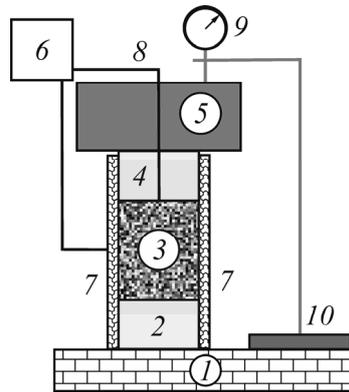


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — теплоизолирующее основание (высота  $b_1$ ); 2, 4 — нижний (высота  $b_2$ ) и верхний (высота  $b_4$ ) пуансон; 3 — образец (высота  $b_3$ ); 5 — груз; 6 — блок регулировки и регистрации температуры; 7 — трубчатая печь; 8 — термодатчик; 9 — индикатор перемещений; 10 — штатив

Установка размещалась на теплоизолирующем основании (газобетон сибит). Изменение высоты системы “нижний пуансон – образец – верхний пуансон” регистрировалось индикатором часового типа ИЧ-10 (абсолютная точность 10 мкм). Для определения приращения вертикального размера  $h$  собственно образца (кружки на рис. 2) перед экспериментом проводилась калибровка системы с помощью алюминиевого эталона тех же размеров, что и образец.

На временном промежутке  $0 \leq t \leq t_s$  осуществлялся нагрев от нормальной  $T_0$  до максимальной температуры  $T_s$ , которая поддерживалась постоянной до момента  $t = t_f$ . Затем печь выключалась и происходило остывание системы до  $T = T_0$  (диаграмма  $T(t)$  показана штриховой линией на рис. 2). Длительность эксперимента  $t_f$  определялась временем стабилизации показаний индикатора, значение  $T_s = 150^\circ\text{C}$  выбрано несколько большим, чем типичная температура пород-коллекторов баженовской свиты [10].

На участке нагрева  $h$  линейно возрастает вследствие температурного расширения, затем (при  $t_s \leq t \leq t_f$ ) под действием статической нагрузки происходит укорочение образца до некоторого постоянного значения (зависящего от свойств породы,  $T_s$  и  $M$ ) и, наконец, при  $t > t_f$  значение  $h$  убывает практически пропорционально  $T_s - T$ . Следует отметить, что на участках  $t < t_s$  и  $t > t_f$  значение  $h$  практически не зависело от массы груза: материал образца начинает проявлять реологические свойства только при достижении определенной температуры.

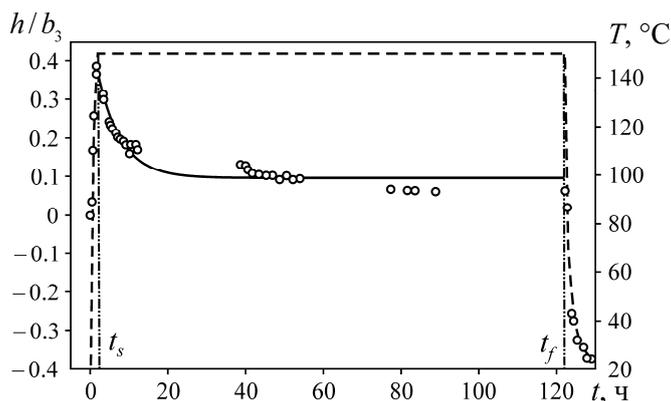


Рис. 2. Экспериментальные данные (кружки) и результаты теоретического моделирования

### ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 3 представлена расчетная область  $G$  — цилиндр радиусом  $R = 0.5D$  и высотой  $H$ , состоящая из трех подобластей. На боковой поверхности задана переменная температура

$$T(R, z, t) = \begin{cases} T_0 + (T_s - T_0) \frac{t}{t_s}, & t < t_s, \\ T_s, & t_s \leq t \leq t_f, \\ T_s - (T_s - T_0) \frac{t - t_f}{t_0 - t_f}, & t > t_f, \end{cases} \quad (1)$$

на нижней  $z = 0$  и верхней  $z = H$  границах — условия теплообмена

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} = \beta_{ij} (T - T_0), \quad (2)$$

где  $(r, z)$  — цилиндрические координаты;  $\lambda_i$  и  $\beta_{ij}$  — коэффициенты теплопроводности и стационарного теплообмена, индексы  $i$  и  $j$  соответствуют номерам областей на рис. 1; на внутренних границах  $G$  температура и поток тепла непрерывны; начальное условие

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

Эволюция температуры в  $G$  описывается параболическим уравнением [11]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_i \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

где  $a_i$  — коэффициент температуропроводности.

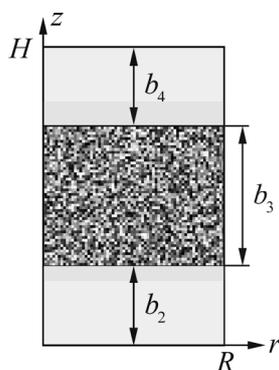


Рис. 3. Схема расчетной области  $G$

Начально-краевая задача (1)–(4) решалась конечно-разностным методом переменных направлений [12] при  $T_0 = 21^\circ\text{C}$ ,  $t_f = 122.8$  ч,  $t_0 = 128$  ч, остальные параметры модели приведены в таблице.

Числовые значения параметров модели

$i^*$	Материал	$b_i$ , мм	$\lambda_i$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$10^6 a_i^0$ , м <sup>2</sup> /с
1	Сибит	200	0.16	—
2, 4	Алюминий	25	210	91
3	Аргиллит	38	3	2–8
5	Железо	25	88	—

\* $i$  — номера элементов по схеме рис. 1.

Значения теплофизических характеристик материалов заимствованы из [7, 13, 14] и справочников [15–17], коэффициенты стационарного теплообмена  $\beta_{12}$  и  $\beta_{45}$  рассчитывались по формуле [8]

$$\beta_{ij} = \frac{\lambda_i \lambda_j}{b_j \lambda_i + b_i \lambda_j}.$$

Необходимо оценить время нагрева  $t_s$ , при котором в испытуемых образцах установится заданная постоянная температура  $T = T_s$ . Теплофизические свойства последних не измерялись, поэтому по справочным данным выбран диапазон вариации температуропроводности аргиллита  $a_3$  (таблица) и проведена серия численных экспериментов.

На рис. 4 в качестве примера показано распределение температуры в горизонтальных сечениях  $z = \text{const}$  в различные моменты времени для двух значений  $a_3 = 2 \cdot 10^{-6}$  и  $6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (сплошные и штриховые линии соответственно). Можно видеть, что при  $t_s > 1.5 - 2$  ч в образце устанавливается постоянная температура. Значение  $t_s$  сравнительно небольшое, поскольку температуропроводность алюминия много больше, чем у горных пород.

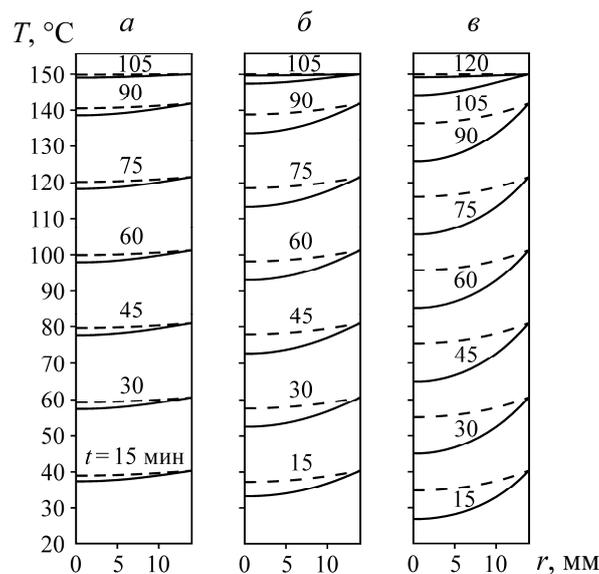


Рис. 4. Распределение температуры в различные моменты времени в горизонтальных сечениях образца:  $a$  —  $z = b_1 + b_2 + 0.5b_3$ ;  $b$  —  $z = b_1 + b_2$ ;  $v$  —  $z = b_1 + 0.5b_2$

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Обозначим  $t_m$  моменты времени, когда регистрируют температуру  $T_m$  и приращение высоты образца  $h_m$  (рис. 2). На промежутке  $0 \leq t_m \leq t_s$  происходит удлинение вследствие термоупругого деформирования так, что

$$\frac{h}{b_3} \cong \alpha(T - T_0), \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного температурного расширения.

Методом наименьших квадратов из (5) можно получить оценку

$$\alpha_n = \frac{\sum_{m=1}^n h_m (T_m - T_0)}{b_3 \sum_{m=1}^n (T_m - T_0)^2}, \quad t_n < t_s, \quad (5)$$

откуда  $\alpha_4 = 0.0019$ ,  $\alpha_5 = 0.0023$ ,  $\alpha_6 = 0.0025$  град<sup>-1</sup>. Полученный набор  $\alpha$  соответствует известному факту: коэффициент линейного расширения растет с увеличением температуры [16]. Аналогично анализируя экспериментальные данные для  $t > t_s$  (рис. 2), найдем  $\alpha = 0.0027$  град<sup>-1</sup>, что менее чем на 10% отличается от  $\alpha_6$ . Такие высокие значения коэффициента температурного расширения характерны для многих органических веществ [16].

Деформирование образца на временном интервале  $[t_s, t_f]$  происходит при постоянных температуре и осевом напряжении  $\sigma_0 = Mg / (\pi R^2)$ . Со временем относительное изменение высоты  $\varepsilon(t) = [h(t_s) - h(t)] / b_3$  стремится к постоянному значению, поэтому данный процесс можно описать вязкоупругой моделью Фойгта [18]

$$E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \sigma_0, \quad \varepsilon(t_s) = 0, \quad (6)$$

где  $E$  и  $\eta$  — эффективные модуль Юнга и вязкость при  $T = T_s$ . Решение (6) имеет вид

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} [1 - e^{-E(t-t_s)/\eta}], \quad (7)$$

введем целевую функцию

$$\Psi(E, \eta) = \frac{\sqrt{(n_2 - n_1 + 1) \sum_{m=n_1}^{n_2} [\varepsilon_m - \varepsilon(t_m, E, \eta)]^2}}{\sum_{m=n_1}^{n_2} \varepsilon_m},$$

где  $\varepsilon_m = [h(t_s) - h_m] / b_3$ ,  $\varepsilon(t, E, \eta)$  — функция (7) при некоторых значениях  $E$  и  $\eta$ ;  $n_1$  и  $n_2$  — минимальное  $m$ , при котором  $t_s \leq t_m \leq t_f$ .

На рис. 5 показаны изолинии  $\Psi$  в безразмерных координатах  $(E/E_0, \eta/\eta_0)$  при  $E_0 = 1.16$  МПа и  $\eta_0 = 3.21 \cdot 10^{10}$  Па·с, выделена область эквивалентности  $\Psi \leq 0.07$ . Целевая функция оказалась унимодальна, поэтому обратная задача определения  $E$  и  $\eta$  по данным измерения деформаций образца однозначно разрешима. Точка минимума  $(E_*, \eta_*)$  функции  $\Psi$  (черный кружок) находилась модифицированным методом сопряженных градиентов [19]. На рис. 5

штриховые линии — траектории соответствующего итерационного процесса при различных начальных приближениях (квадраты). На рис. 2 сплошной линией показана теоретическая зависимость  $h(t) = b_3 \varepsilon(t, E_*, \eta_*) + h(t_s)$  при  $E_* = 1.29$  МПа и  $\eta_* = 2.78 \cdot 10^{10}$  Па·с.

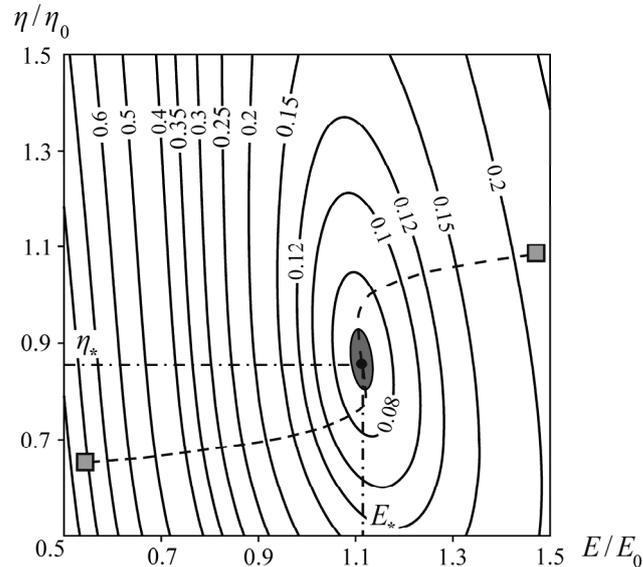


Рис. 5. Линии уровня целевой функции при  $n_1 = 6$  и  $n_2 = 43$

В пластовых условиях ( $T = 100 - 120^\circ\text{C}$ ) модуль Юнга плотных баженитов на три порядка выше [20], что можно объяснить рядом причин: использование акустических методов для определения упругих свойств пород, более низкая температура, всестороннее сжатие, а также вариативность свойств баженитов в зависимости от генезиса и вещественного состава [21, 22].

### ВЫВОДЫ

Предложена и реализована схема термобарических испытаний горных пород, при которых регистрируется изменение во времени вертикального размера образца  $h(t)$  при постоянной осевой нагрузке и переменной температуре  $T$ . Разработан метод интерпретации получаемых данных, позволяющий в рамках одного теста установить термоупругие и реологические параметры пород на основе решения обратной задачи.

Проведенные эксперименты с образцами баженитов (Салымское месторождение, Западная Сибирь) показали, что при повышении температуры их деформирование носит вязкоупругий характер вследствие высокого содержания органического вещества. В рамках модели Фойгта сформулирована и решена обратная задача определения модуля Юнга  $E$  и вязкости  $\eta$ , если в качестве входной информации используется кривая последействия  $h(t)$ . Установлено, что при температуре  $150^\circ\text{C}$  (выше типичной для баженовской свиты) значения  $E$  и  $\eta$  на несколько порядков меньше таковых в пластовых условиях. Это может привести к уменьшению проницаемости коллектора при применении тепловых методов для извлечения нефти.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прищепа О., Халимов Э. Трудноизвлекаемая нефть: потенциал, состояние и возможность освоения // Нефтегазовая вертикаль. — 2011. — № 5. — С. 24–29.
2. Butler R. M. Thermal recovery of oil and bitumen, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1991. — 528 p.

3. Федоров К. М., Андреев В. Е., Котенев Ю. А., Хайрединова Д. Н. Повышение эффективности выработки запасов тепловыми методами интенсификации добычи // Методы увеличения нефтеотдачи трудноизвлекаемых запасов: Проблемы и решения: сб. науч. тр. НИИнефтеотдача. — Уфа, 2003. — Вып. 4. — С. 105–107.
4. Байков Н. К., Гарушев А. Р. Тепловые методы разработки нефтяных месторождений. — М.: Недра, 1981. — 286 с.
5. Гиматулинов Ш. К., Ширковский А. И. Физика нефтяного и газового пласта. — М.: Недра, 1982. — 313 с.
6. Bennion D. B., Ma T., Thomas F. B., Romanova U. G. Laboratory procedures for optimizing the recovery from high temperature thermal heavy oil and bitumen recovery operations. Petroleum Society's 8<sup>th</sup> Canadian Int. Petroleum Conf. (58<sup>th</sup> Annual Technical Meeting), Calgary, Alberta, Canada, June 12–14, 2007. — P. 206.
7. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1978. — 390 с.
8. Гончаров С. А. Термодинамика. — М.: МГУ, 2002. — 440 с.
9. Коллекторы нефтей баженовской свиты Западной Сибири / под ред. Т. В. Дорофеевой. — Л.: Недра, 1983. — 131 с.
10. Курчиков А. Р., Ставицкий Б. П. Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. — М.: Недра, 1987. — 136 с.
11. Nowacki W. Thermoelasticity, 2<sup>nd</sup> Ed. Pergamon Press, 1986. — 578 p.
12. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. — М.: Наука, 1971. — 553 с.
13. Hanley E. J., Dewitt D. P., Roy R. F. The thermal diffusivity of eight well-characterized rocks for the temperature range 300–1000 K, Engineering Geology, 1978, Vol. 12. — P. 31–47.
14. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. — М.: Наука, 1975. — 536 с.
15. Дортман Н. Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. — М.: Недра, 1984. — 455 с.
16. Новый справочник химика и технолога. Т. 1. Основные свойства неорганических, органических и элементоорганических соединений / под ред. Н. К. Скворцова. — СПб.: АНО НПО “Мир и Семья”, 2002. — 1280 с.
17. Казанцев Е. И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. — М.: Металлургия, 1975. — 368 с.
18. Cristescu N. Elastic-viscoplastic constitutive equation for rock, Int. J. of Min. Sci. and Geomech. Abstr, 1987, Vol. 24, No. 5. — P. 271–282.
19. Назаров Л. А., Назарова Л. А., Карчевский А. Л., Панов А. В. Оценка напряжений и деформационных свойств породных массивов на основе решения обратной задачи по данным измерений смещений на свободных границах // Сиб. журн. индустриальной математики. — 2012. — Т. 15. — № 4. — С. 102–109.
20. Стасюк М. Е., Коротенко В. А., Щеткин В. В. и др. Определение модулей деформирования по результатам испытаний плотных баженинов // Исследования залежей углеводородов в условиях научно-технического прогресса: сб. науч. тр. — Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1988. — С. 19–26.
21. Немова В. Д. Баженовская свита: строение, свойства и методики лабораторных исследований, SPE, Moscow section, 2012, 11.
22. Немова В. Д. Условия формирования коллекторов в отложениях баженовского горизонта в районе сочленения Краснотенинского свода и Фроловской мегавпадины // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2012. — Т. 7. — № 2. [http://www.ngtp.ru/rub/4/23\\_2012.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/4/23_2012.pdf).

*Поступила в редакцию 3/IV 2017*