УДК 001.891.53, 624.131.37

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УСТАНОВКЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТРЁХОСНОГО СЖАТИЯ ГТ-1.3.9

Барков С.О. – младший научный сотрудник,
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
Россия, г. Москва

Необходимыми исходными данными для построения геомеханических моделей месторождений, выбора оптимальных параметров бурения и обеспечения безопасной эксплуатации скважин являются статические модули упругости пород, определяемые по результатам лабораторных испытаний на одноосное и трёхосное сжатие. В то же время в ходе геофизических исследований скважин (ГИС) регистрируются скорости распространения в породах продольных (P) и поперечных (S) ультразвуковых волн, по которым рассчитываются динамические модули упругости. В рамках линейной упругости для однородной изотропной среды динамические и статические модули упругости совпадают [1]. Однако для пористых сред, таких как горные породы, динамические модули упругости существенно зависят от напряжённого состояния, степени трещиноватости и насыщения породы флюидами и, как правило, превышают статические значения [2,3].

Определение динамических модулей упругости горных пород в лабораторных условиях под действием напряжений, соответствующих реально существующим в пласте, играет ключевую роль в корректной интерпретации данных ГИС. Проведение испытаний на одноосное и трёхосное сжатие с одновременным ультразвуковым мониторингом позволяет получать зависимости динамических модулей исследуемых пород от напряжённого состояния. На основе результатов таких испытаний строятся эмпирические зависимости пересчёта динамических модулей в эквивалентные статические модули упругости [4]. Это, в свою очередь, обеспечивает корректный переход от геофизических измерений в скважине к параметрам, используемым при численном моделировании напряжённо-деформированного состояния пород-коллекторов и анализе устойчивости скважин.

В рамках данной работы на модельном цилиндрическом образце из дюралюминия (Д16т) с диаметром 30 мм и высотой 60 мм была отработана методика проведения на установке осесимметричного трехосного сжатия ГТ-1.3.9 [5] (рис. 1а) испытаний на одноосное сжатие с одновременным измерением скоростей распространения в образце P- и S-волн. Для реализации данного испытания использовались специальные штампы для УЗ-исследований со встроенными пьезоэлектрическими преобразователями, каждый из которых позволяет генерировать и принимать P- и S-волны. Для лучшего ввода S-волн в образец использовалась специальная

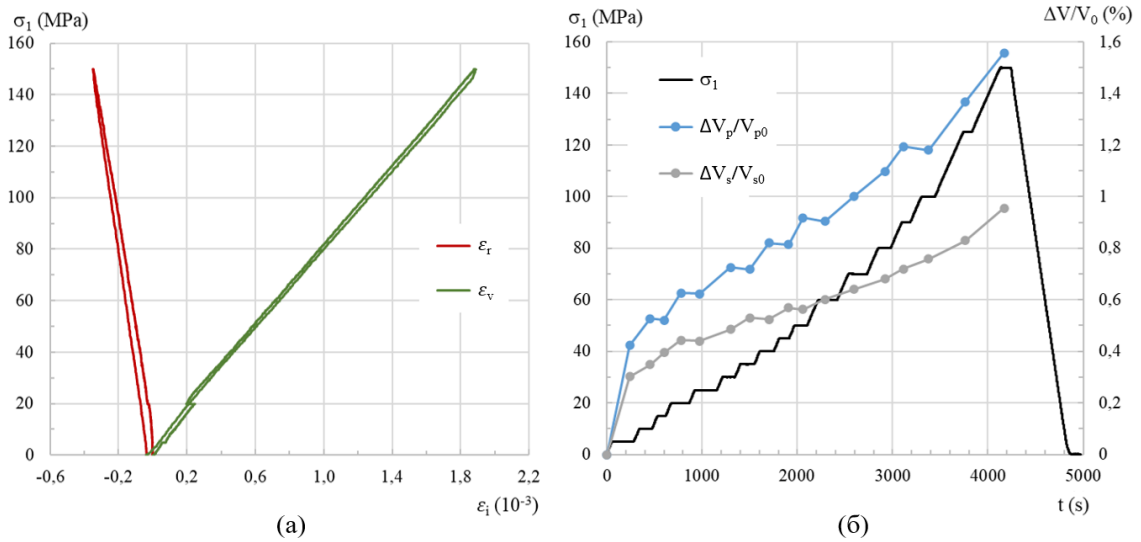
высоковязкая смазка. Измерение осевой и окружной деформации образца осуществлялось при помощи LVDT-датчиков (рис. 1б). При этом пара LVDT-датчиков для измерения вертикальной (осевой) деформации образца размещались в средней части образца на локальной базе измерений 37 мм.



(а) (б)

Рисунок 1 – Установка осесимметричного трехосного сжатия ГТ-1.3.9 (а), Образец дюралюминия между штампами для уз-исследований с установленными LVDT-датчиками в ходе испытания (б)

Увеличение осевой нагрузки на образец носило ступенчатый характер: до 50 МПа шаг нагружения составлял 5 МПа, от 50 до 100 МПа – 10 МПа, от 100 до 150 МПа – 25 МПа. При этом скорость нагружения была постоянной и составляла 5 МПа/мин. На каждом шаге осуществлялось измерение времени прохождения через образец P- и S-волн. При расчете скорости волн учитывалось изменение высоты образца под нагрузкой. На рис. 2а представлены кривые деформирования образца в ходе испытания, где ε_r и ε_v – относительные радиальная и вертикальная (осевая) деформации, а σ_1 – осевое напряжение. На рис. 2б представлены относительные изменения V_p и V_s в ходе испытания, где V_{p0} и V_{s0} – скорости продольных и поперечных волн в образце в отсутствии осевой нагрузки.



(а) (б)

Рисунок 2 – Результаты одноосного сжатия образца из дюралюминия: кривые деформирования (а), Относительные изменения скоростей распространения продольных и поперечных УЗ-волн в образце под нагрузкой (б)

Расчет динамических модуля Юнга ($E_{дин}$), модуля сдвига ($G_{дин}$) и коэффициента Пуассона ($\nu_{дин}$) осуществлялся согласно формулам:

$$\nu_{дин} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)};\ E_{дин} = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2};\ G_{дин} = \rho V_s^2, \quad (1)$$

где ρ = 2800 кг/м^3 – плотность дюралюминия.

Расчет статических модуля Юнга ($E_{ст}$), модуля сдвига ($G_{ст}$) и коэффициента Пуассона ($\nu_{ст}$) осуществлялся по кривой σ-ε для интервала напряжений σ_1 = 40-140 МПа согласно формулам:

$$\nu_{ст} = -\frac{\Delta\varepsilon_r}{\Delta\varepsilon_v};\ E_{ст} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_v};\ G_{ст} = \frac{E_{ст}}{2(1+\nu_{ст})}. \quad (2)$$

Результаты проведенных расчетов для некоторых значений σ_1 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытания на одноосное сжатие дюралюминия с одновременным ультразвуковым мониторингом

σ1, МПа	**Vp, м/с**	**Vs, м/с**	**νдин**	**дин, ГПа**	**дин, Па**	**νст**	**ст, Па**	**ст, Па**
0	6451,61	3092,78	0,3508	2,36	6,78	0,1915	6,96	2,29
50	6510,79	3110,19	0,3522	3,25	7,09			
100	6527,79	3116,23	0,3524	3,55	7,19			
150	6552,09	3122,32	0,3531	3,87	7,30			

Видно, что с увеличением осевой нагрузки V_p и V_s, а, следовательно, и динамические модули упругости, возрастают, что согласуется с классическими представлениями о распространении УЗ-волн в твердых телах и работами других авторов [6, 7]. Важно также отметить, что рассчитанные на основе ультразвуковых измерений модули упругости и коэффициент Пуассона с высокой точностью совпадают со среднестатистическими (табличными) значениями для данного материала (Д16т) [8]: $E_т$ = 72-74 ГПа, $G_т$ = 26-27 ГПа, $\nu_т$ = 0,33-0,34. При этом различие в $E_{дин}$ и $E_{ст}$ является несущественным и не превышает 6,5%, а $\nu_{ст}$ оказался существенно ниже $\nu_{дин}$ (примерно на 45%). Последнее может быть обусловлено неточной установкой роликовой цепи для LVDT-датчика, что будет проверено в последующих испытаниях. Поскольку расчет $G_{ст}$ основывался на измеренном $\nu_{ст}$ его значение ожидаемо оказалось завышенным в сравнении с $G_{инл}$. Отработанная в ходе данных исследований методика в дальнейшем будет использоваться при реализации испытаний пород-коллекторов с одновременным ультразвуковым мониторингом на установке ГТ-1.3.9.

Работа выполнена в рамках государственного задания, номер госрегистрации 124012500441-6.

Список литературы:

1. Bian, H. Y. Experimental study of dynamic and static elastic parameters of tight sandstones under reservoir conditions / H. Y. Bian, F. Wang, Y. H. Zhang, C. W. Yue // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. — 2015. — Т. 34, suppl. 1. — С. 3045–3054.

2. Eissa, E. A. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks / E. A. Eissa, A. Kazi // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 1988. — Т. 25, № 7. — С. 479–482. — DOI: 10.1016/0148-9062(88)90987-4.

3. Wang, Y. Micro-mechanical analysis of the effects of stress cycles on the dynamic and static mechanical properties of sandstone / Y. Wang, L. Zhao, D.-h. Han [et al.] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2020. — Т. 134. — 104431. — DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104431.

4. Shen, S. A comparison of the relationship between dynamic and static rock mechanical parameters / S. Shen, Y. Gao, L. Jia // Applied Sciences. — 2024. — Т. 14, № 11. — 4487. — DOI: 10.3390/app14114487.

5. Барков, С. О. Изучение особенностей проведения трехосных испытаний горных пород на установке осесимметричного трехосного сжатия ГТ 1.3.9 и установке истинно трехосного нагружения ИСТНН [Электронный ресурс] / С. О. Барков, В. В. Химуля // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сб. материалов VII Международной научно-практической конференции (21–23 ноября 2023 г., Кемерово). — Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева, 2023. — С. 413–417.

6. Wang, Y. A comparative study of the stress-dependence of dynamic and static moduli for sandstones / Y. Wang, D.-H. Han, H. Li [et al.] // Geophysics. — 2020. — Т. 85, № 4. — С. MR179–MR190. — DOI: 10.1190/geo2019-0335.1.

7. Motra, H. B. Influence of loading and heating processes on elastic and geo-mechanical properties of eclogites and granulites / H. B. Motra, S. Zertani // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2018. — Т. 10, № 1. — С. 127–137. — DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.11.001.

8. Густов, Ю. И. Исследование соотношений модулей касательной и нормальной упругости материалов / Ю. И. Густов, И. В. Воронина // Системные технологии. — 2022. — № 42. — С. 134–139.