

## Экспериментальное определение объемного модуля упругости эластичной камеры гидравлического силового элемента

*А. Е. Грачев<sup>1</sup>, А. О. Кордубайло<sup>1</sup>, Б. Ф. Симонов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия  
e-mail: grachev.aleksey.evg@mail.ru

**Аннотация.** Одной из основных задач современной нефтегазовой промышленности является увеличение степени извлечения углеводородов из месторождений. Для решения данной проблемы создаются и внедряются различные методы повышения нефтеотдачи пластов. Одним из перспективных методов является вибровоздействие на пласт скважинными виброисточниками, в которых рабочее усилие на обсадную колонну передаётся с помощью гидромеханических силовых элементов. В процессе работы силового элемента его эластичная камера испытывает сложное напряженно-деформированное состояние под действием высокого давления рабочей жидкости. Для выполнения расчётов динамических процессов в силовом элементе и выбора оптимальных конструктивных параметров при проектировании необходимо знать зависимость объёмного модуля упругости эластичной камеры от действующего давления. В работе описана методика эксперимента и результаты определения объёмного модуля упругости эластичной камеры при допустимых деформациях.

**Ключевые слова:** скважинный виброисточник, эластичная камера, объёмный модуль упругости, давление жидкости, гидравлический силовой элемент, эксперимент

## Experimental determination of the bulk modulus of elasticity of the elastic chamber of a hydraulic power element

*A. E. Grachev<sup>1</sup>, A. O. Kordubailo<sup>1</sup>, B. F. Simonov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Federal State Budget Institution of Science Institute of Mining N. A. Chinakal of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** One of the main problems of the modern oil and gas industry is to increase the degree of extraction of hydrocarbons from fields. As a solution, various methods of enhanced oil recovery are being introduced. One of the promising methods is the vibration impact on the formation by downhole vibration sources, in which the working force on the casing string is transmitted using hydromechanical power elements. During operation of the power element, its elastic chamber experiences a complex stress-strain state under the action of high pressure of the working fluid. To perform calculations of dynamic processes in a load-bearing element and select the optimal design parameters during design, it is necessary to know the dependence of the volumetric modulus of elasticity of an elastic chamber on the acting pressure. The paper describes the experimental technique and the results of determining the bulk modulus of elasticity of an elastic chamber under working deformations.

**Keywords:** borehole vibration source, elastic chamber, modulus of elasticity, fluid pressure, hydraulic power element, experiment

## *Введение*

Нефтегазовая промышленность постоянно сталкивается с проблемой извлечения из пласта остаточного углеводородного сырья. Современные технологии позволяют добывать около 30-40% от всего запаса месторождения [1-2]. Для увеличения степени извлечения сырья применяются различные методы повышения нефтеотдачи пластов [3-5]. Среди них наиболее распространенные – химические, физические и тепловые [6-9].

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала ведет разработку еще одного перспективного метода – вибровоздействие на продуктивный пласт [10-12]. Для реализации данного метода был спроектирован и изготовлен скважинный электромагнитный импульсный виброисточник (далее СВИ). Принцип работы СВИ заключается в создании ударного импульса и последующей его передачи в продуктивный пласт через обсадную колонну скважины. Конструктивная схема приведена на рисунке 1.

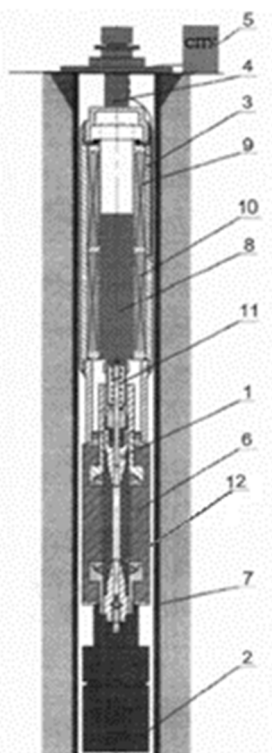


Рис. 1. Конструктивная схема СВИ

СВИ опускается в скважину на глубину залегания нефтяного пласта. Система питания управления (далее СПУ) 5 подает питание на двигатель гидронасоса 2, в следствие чего происходит заполнение камеры 12 рабочей жидкостью. Внешняя поверхность камеры через клинья раздвигает пуансоны 6, тем самым прижимая их к обсадной колонне 7. После прижатия упора, внутри камеры создается повышенное давление. По достижению необходимого давления СПУ 5

отключает двигатель привода насоса 2, запирая рабочую жидкость внутри камеры и предотвращая потерю давления. После процесса предварительной заправки СПУ 5 подает напряжение на верхнюю катушку 9. Под действием электромагнитных сил катушки 9 боек 8 совершает движение вверх. По достижению бойка 8 торца катушки 9, СПУ отключает ее, одновременно с этим подавая напряжения на катушку 10. Под действием электромагнитной силы катушки 10, а также силы тяжести, боек 8 движется вниз, нанося удар по плунжеру 11 гидромеханического силового элемента 3, создавая в нем импульс давления. Так как силовой элемент 1 находится под давлением, происходит передача ударного импульса в обсадную колонну 7 через расперты пуансоны 6. Далее импульс распространяется в породе в виде сейсмической волны. Безопасность, а также стабильность работы обеспечивается системой питания управления.

Во время работы СВИ внутри резиновой камеры поддерживается давление 15 МПа, на это стационарное давление накладывается импульс давления, величиной 15 МПа. Камера расширяется в радиальном направлении, при этом ее стенка становится тоньше. В то же время ее оболочка растягивается. В итоге камера находится в сложно напряженном состоянии. При расчете динамических параметров, а также принятии верных конструктивных решений при проектировании необходимо знать ее модуль объемной упругости при работе [13]. При этом, как уже сказано выше, интересующий нас диапазон находится в пределах от 0 до 30 МПа.

При атмосферном давлении большинство марок технических резин имеют модуль упругости в пределах 1-4 МПа в зависимости от марки, степени твердости и других параметров [14-15]. Однако повышение давления, действующего на резину, меняет ее свойства. ГОСТ ISO 7743-2013 «Резина и термоэластопласты. Определение упругих и прочностных свойств при сжатии» регламентирует лабораторные испытания плоских образцов резин и резинотехнических изделий (с учётом их формы) в условиях одноосного сжатия между металлическими пластинами [16]. При этом методе вычисляются упругие деформации при сжатии образца до 25%. Однако в нашем случае в силовом элементе СВИ деформации резины составляют около 200-250%. Помимо этого, отличается и характер приложения нагрузки. Именно поэтому данное исследование является весьма актуальным и необходимым для практических целей.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение зависимости объемного модуля упругости эластичной камеры от действующего на него давления.

### ***Материалы и методы.***

Для проведения экспериментов был разработан и изготовлен стенд, представленный на рисунке 2.

Стенд состоит из основания 1, на котором в опорном стакане 3 размещен фрагмент обсадной трубы 2. Внутри обсадной трубы установлен силовой элемент 4, а именно пуансон 5, клинья 6, эластичную камеру 7, ниппель 8. Коллектор 9 с запорным клапаном 10 и штуцерами 11, 12 крепятся к ниппелю. Силовой

элемент снабжен манометром 13, гидронасосом 14, имеющим клапан 15, а также обратный клапан 16 с ручным приводом 17. Индикатор часового типа 18 фиксирует деформацию обсадной трубы 2. Расходомер 19 позволяет контролировать объем закачанной жидкости.

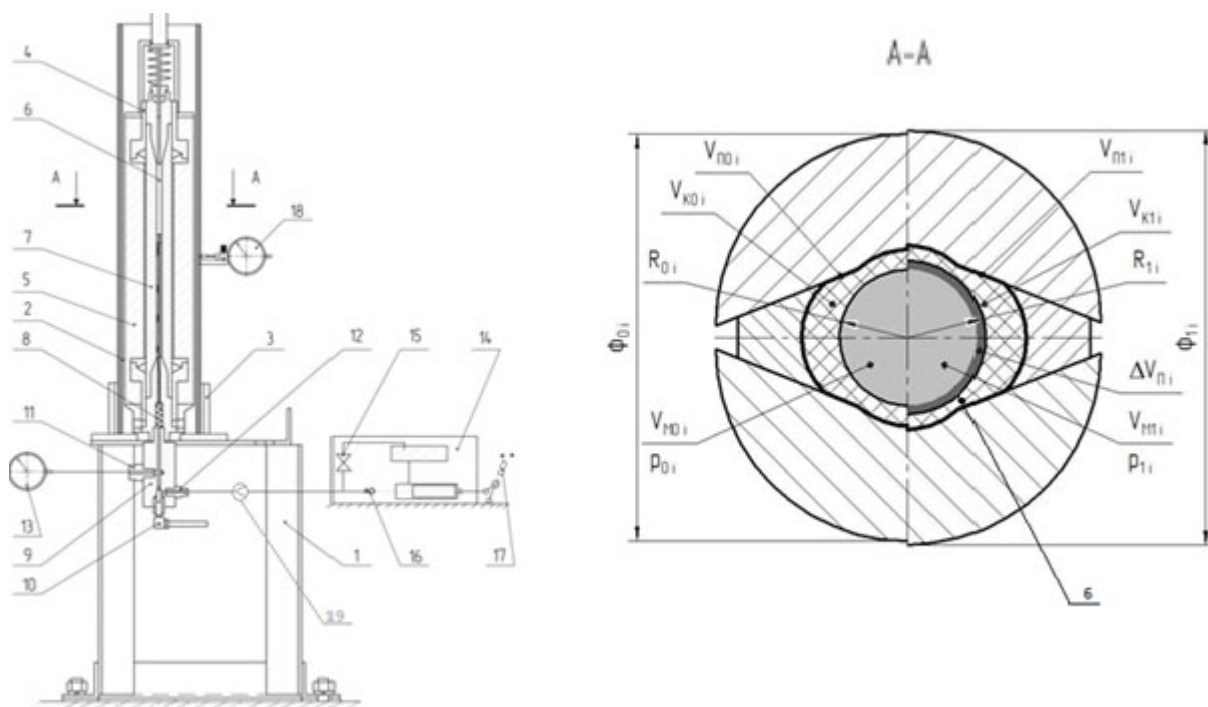


Рис. 2. Стенд для определения модуля упругости эластичной камеры

Суть эксперимента заключается в одновременном измерении трех параметров: давление рабочей жидкости (масло индустриальное И-40А); объем закачанной рабочей жидкости; диаметра обсадной трубы в направлении распорной силы. Заключительным этапом является расчет объемного модуля упругости эластичной камеры.

Методика проведения эксперимента по определению объемного модуля упругости  $K_K$ :

- Предварительное вычисление объема масла в эластичной камере под атмосферным давлением и объема самой камеры
- Закачка масла в силовой элемент при помощи гидронасоса и создание давления  $p_{li}$  с дальнейшей фиксацией объема закачиваемого масла  $V_{mli}$  и диаметра обсадной трубы  $\phi_{mli}$
- Исходя из значения  $\phi_{mli}$ , при помощи метода графического построения, вычисляется объем полости силового элемента  $V_{nli}$ , ограниченного пуансоном и клиньями
- При помощи гидронасоса происходит подкачка масла в силовой элемент до давления  $p_{li+1}$ , после чего предыдущие пункты повторяются.

$$V_{n0i} = V_{m0i} - \Delta V_{сж.м0i} + V_{к0i}, \quad (1)$$

$$V_{n1i} = V_{m1i} - \Delta V_{сж.м1i} + V_{к1i}, \quad (2)$$

$$V_{n1i} = V_{n0i} + \Delta V_{ni}, \quad (3)$$

$$V_{к1i} = V_{к0i} - \Delta V_{ки}, \quad (4)$$

где  $V_{n0i}$  и  $V_{n1i}$  – объём полости, ограниченной пуансонами и клиньями;  $V_{m0i}$  и  $V_{m1i}$  – количество масла в эластичной камере при давлении;  $\Delta V_{сж.м}$  – величина сжатия масла под давлением;  $V_{к0i}$  и  $V_{к1i}$  – объём, занимаемый эластичной камерой;  $\Delta V_{ni}$  – увеличение объёма полости за счёт раздвижения пуансонов;  $\Delta V_{ки}$  – сжатие материала эластичной камеры под действием разности давлений  $p_{1i} - p_{0i}$ .

Из уравнений 1-4 следует:

$$\Delta V_{ки} = V_{m1i} - V_{m0i} - \Delta V_{ni} + \Delta V_{сж.м0i} - \Delta V_{сж.м1i} \quad (5)$$

Величина сжатия масла под действием рабочего давления жидкости:

$$\Delta V_{сж.ми} = V_{mi} \frac{p_i}{K_m} \quad (6)$$

где  $K_m$  – объёмный модуль упругости масла И-40А. В исследуемом диапазоне давлений (от 0,1 до 40 МПа) модуль упругости масла можно принять постоянным. Для масла И-40А  $K_m = 1450$  МПа [17].

Средний модуль объёмной упругости эластичной камеры в диапазоне давлений от  $p_{0i}$  до  $p_{1i}$ :

$$K_k = V_{к0i} \frac{p_{1i} - p_{0i}}{\Delta V_{ки}}.$$

### **Результаты**

В СВИ гидромеханический силовой элемент имеет резиновую эластичную камеру, которая в свою очередь испытывает сложное напряженно-деформированное состояние под действием высокого давления рабочей жидкости. Для расчета динамических процессов и выбора конструктивных параметров, необходимо знать объёмный модуль упругости.

После проведения опыта была получена зависимость объёмного модуля упругости эластичной камеры от давления рабочей жидкости, а также построен график, представленный на рисунке 3.

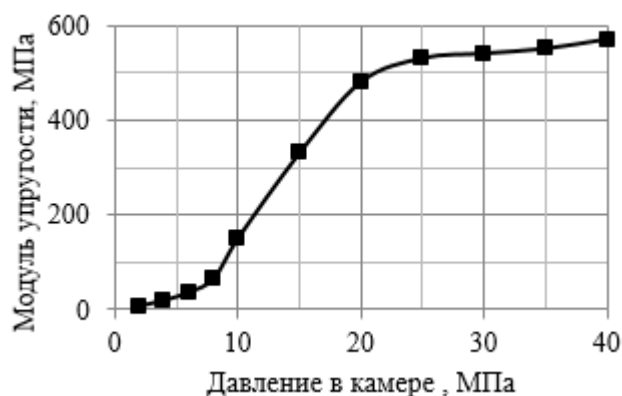


Рис. 3. Зависимость объемного модуля упругости от давления

### *Обсуждение*

Известные методы определения модулей упругости резин, подробно описанные во введении, подразумевают проведение испытаний в условиях атмосферного давления при небольших деформациях образцов (до 25-30%) с одноосным приложением нагрузки. При этом экспериментальные значения модулей упругостей разных марок резины составляют 1-4 МПа. Такие значения не могут использоваться в расчётах гидравлических силовых элементов, т.к. результаты будут не корректны. Разработанная методика проведения эксперимента по определению модуля упругости эластичной камеры непосредственно в рабочем силовом элементе при деформациях материала 200-250% позволила определить объективные значения модуля упругости в пределах 150-580 МПа в диапазоне давлений рабочей жидкости от 10 до 40 МПа.

### *Заключение*

В представленной работе достигнуты следующие результаты

1. Разработана методика эксперимента, позволяющего определять объемный модуль упругости эластичной камеры силового элемента скважинного виброисточника при рабочих деформациях.
2. Установлена зависимость объемного модуля упругости от давления рабочей жидкости в силовом элементе. Полученные экспериментальные результаты необходимы для расчётов динамических процессов в силовых элементах скважинного виброисточника с высокой точностью.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гайфуллина М.М., Маков В.М. Оценка развития нефтеперерабатывающего сектора Российской Федерации // Нефтегазовое дело. – 2016. – №4. – С.208-214.
2. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986. – 608 с.
3. Симонов Б. Ф., Сердюков С. В., Чередников Е. Н. и др. Результаты опытно-промышленных работ по повышению нефтеотдачи пластов вибросейсмическим методом // Нефт. хоз-во. — 1996. — № 5. — С. 48 – 52.

4. Дыбленко В.П., Марчуков Е.Ю., Туфанов И.А. и др. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами. – М.: РЕАН, 2012. – 344 с.
5. Опарин, В.Н. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях / В.Н. Опарин, Б.Ф. Симонов, В.Ф. Юшкин, В.И. Востриков, Ю.В. Погарский, Л.А. Назаров — Новосибирск: Наука, 2010. — 404 с.
6. Oparin V. N., Simonov B. F. Nonlinear deformation-wave processes in the vibrational oil geotechnologies, J. of Mining Science, 2010, Vol. 46, No. 2. — P. 95 – 112.
7. Апасов Т.К., Апасов Р.Т., Апасов Г.Т. Методы интенсификации добычи нефти и повышения нефтеотдачи для месторождений Западной Сибири: Учебное пособие – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. – 187 с.
8. Крянев, Д.Ю., Жданов С.А. Применение методов увеличения нефтеотдачи пластов в России и за рубежом. Опыт и перспективы // Бурение и нефть. – 2011. – №2. – С. 22-26.
9. Ибрагимов Л.Х., Мищенко И.Т., Челюнец Д.К. Интенсификация добычи нефти – М.: Наука, 2000. – 414 с.
10. Симонов Б.Ф., Чередников Е.Н. и др. Технология объёмного волнового воздействия на нефтегазовые залежи для повышения углеводородоотдачи пластов // Нефтяное хозяйство. – 1998. – № 4. – С. 42–44.
11. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. – Новосибирск: Наука, 2010. – 404 с.
12. Савченко А. В., Симонов Б. Ф., Чередников Е. Н. Влияние гидроимпульсных воздействий на призабойную зону продуктивного пласта // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 285–288.
13. Кордубайло, А.О. Исследование конструкций скважинного электромагнитного импульсного виброисточника / А.О. Кордубайло, Б.Ф. Симонов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – №5 – С.146-153.
14. Кордубайло, А.О. Исследование тяговых характеристик электромагнитов для скважинного виброисточника / А.О. Кордубайло, Б.Ф. Симонов // Интерэкспо Гео–Сибирь. – 2018. – Т.5. – С. 74–79.
15. Кордубайло, А.О. Исследование компрессионно-вакуумного сопротивления движению бойка ударного узла скважинного виброисточника / А.О. Кордубайло, А.Ю. Примычкин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – №3. – С.137–142.
16. ГОСТ ISO 7743-2013 РЕЗИНА И ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТЫ. Определение упругопрочностных свойств при сжатии
17. Кордубайло, А.О. К расчёту распорной силы гидравлического силового элемента для скважинного виброисточника / А.О. Кордубайло, Б.Ф. Симонов, Ю.В. Погарский // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т.3. – №2 – С.98–101.

© А. Е. Грачев, А.О. Кордубайло, Б. Ф. Симонов, 2022