

## МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

Анатолий Александрович КИСЛИЦЫН<sup>1</sup>  
Василий Юрьевич СУХАЧЕВ<sup>2</sup>

УДК 622.257.1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСАДКИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой микро- и нанотехнологий,  
Тюменский государственный университет  
akislicyn@utmn.ru

<sup>2</sup> аспирант кафедры Микро- и нанотехнологий,  
Тюменский государственный университет;  
ведущий инженер Шлюмберже  
vasya@suhachev.com

#### Аннотация

В данной статье предложен метод определения объемной усадки цементного раствора, заключающийся в измерении скорости фильтрации жидкости или газа через зазор между цементным камнем и стенкой ячейки прибора, образовавшийся в результате объемной усадки. В методе используется стандартная и широко распространенная ячейка для измерения водоотдачи по стандарту API RP 10B-2. Выполнены эксперименты со стандартными тампонажными системами. Была измерена усадка тяжёлого

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке научной школы НШ-6987.2016  
(Науч. рук. Р. И. Нигматулин).

**Цитирование:** Кислицын А. А. Определение усадки цементного камня в лабораторных условиях / А. А. Кислицын, В. Ю. Сухачев // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 1. С. 42–51.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-42-51

раствора с плотностью 1 900 кг/м<sup>3</sup> и облегченного раствора с плотностью 1 600 кг/м<sup>3</sup>. Измерялся расход азота и керосина. В статье показано, что для легкого цемента предложенный метод показывает хорошую сходимость экспериментов и может применяться на практике. Для тяжелых растворов цемента предлагаемый метод дает только качественные результаты.

### Ключевые слова

Тампонажный раствор, миграция газа, объемная усадка, химическая усадка, газопроявления, цементный камень, усадка цемента.

**DOI:** 10.21684/2411-7978-2016-2-1-42-51

### Введение

Качество крепления скважин имеет определяющее значение для безаварийной эксплуатации месторождения на протяжении всего срока его разработки. Крепление скважины осуществляется обсадными колоннами с последующим цементированием затрубного пространства. При этом для успешного проведения цементажной работы необходимо добиться минимальной усадки цементного камня; только тогда будет достигнута достаточная прочность и долговечность скважины, а также надежное разобщение пластов [1-2; 8].

Существующие лабораторные методы, которые позволяют определить, как меняется со временем объем цементного камня, имеют ряд недостатков: в частности, не существует простого метода определения усадки цементного камня в безводной среде. В данной работе мы предлагаем такой метод, который не требует применения сложного оборудования.

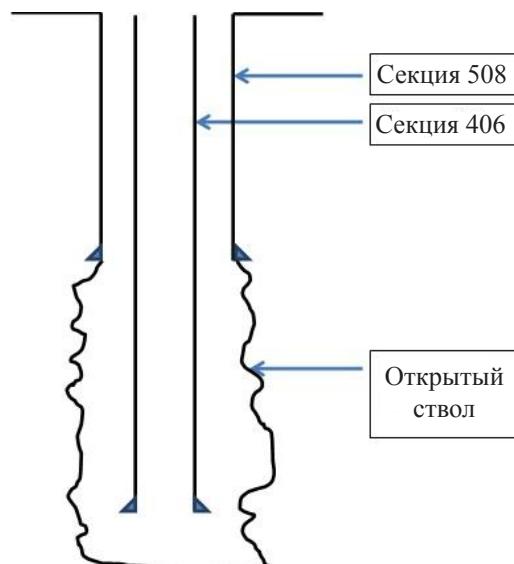


Рис. 1. Конструкция скважины

### Постановка задачи

Схема вертикальной скважины приведена на Рис. 1. Характерные размеры таковы: диаметр цементируемой обсадной колонны 406 мм, длина — 1 000 м; диаметр предыдущей секции 508 мм, длина — 300 м. В качестве цементирующего материала используется стандартный раствор плотности 1,9 г/см<sup>3</sup>. Проблемы миграции газа во время проведения работы по цементированию и в первые часы после нее были рассмотрены в статье [6], и в данной работе рассматриваться не будут.

Если в процессе работ по цементированию и во время перехода цемента из жидкого состояния в гелеобразное и твердое миграция пластовых газов не происходила, то цементный камень приобретает начальную прочность в 3,4 атмосфер на сжатие. Далее происходят процессы химической и объемной усадки цемента, причем в наибольшей мере изменение объема цементной оболочки будет заметно в пространстве между двумя обсадными колоннами, т. к. цемент здесь находится в безводной среде. Поэтому с течением времени может произойти отслоение цементной оболочки от предыдущей колонны с образованием микро-зазора на протяжении всей секции в межколонном пространстве, что неминуемо приведет к появлению газа на устье скважины [2; 8]. Разделяют два типа усадки цемента: «химический» и «объемный».

Химическая усадка является результатом того, что продукты реакции гидратации цемента имеют большую плотность, чем исходные компоненты. Схематически этот процесс изображен на Рис. 2. В процессе гидратации цемент реагирует с водой, при этом цементная гранула растет, а общий объем системы «цементная гранула + вода» падает.

Объемная усадка — это уменьшение внешнего объема, которое может происходить в процессе гидратации цемента. Это механический отклик на давление и изменение порового давления вследствие химической усадки. Процесс объемной усадки схематически изображен на Рис. 3. Важно отметить, что объ-

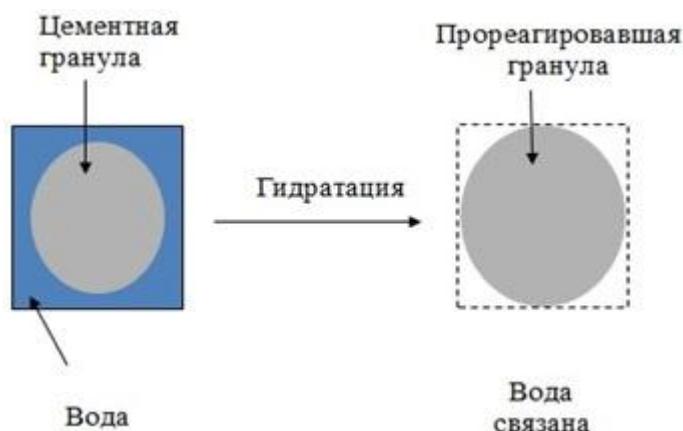


Рис. 2. Процесс химической усадки

емная усадка происходит в разной степени в зависимости от доступа к воде. Наиболее сильное уменьшение объема образца будет происходить без его доступа к воде [8].

Наиболее распространенными лабораторными методами определения объемной усадки цементного камня являются «мембранный» метод, а также метод по стандарту API 10B-5.

Для определения изменения объема мембранным методом образец цементного камня помещается в непроницаемую эластичную мембрану наподобие воздушного шарика. Объем образца измеряется путем взвешивания в воде. Весы показывают массу вытесненной воды, пересчитать которую в объем погруженного в воду образца можно по формуле  $V = m_{воды}/\rho_{воды}$ . К преимуществам данного метода можно отнести относительную простоту. Недостатком является невозможность исследовать влияние среды, в которой находится образец (т. к. он постоянно окружен мембраной), а также малая точность эксперимента: обычно удается лишь определить, расширяется ли цемент, или происходит его усадка [8].

В методе по стандарту API 10B-5 используется специальная ячейка, основным элементом которой является упругое кольцо с прорезью (Рис. 4).

При расширении или усадке цементного камня размер прорези меняется. В миллиметре от прорези с каждой стороны прикреплены штыри для удобства измерения размера прорези. К преимуществам данного эксперимента можно

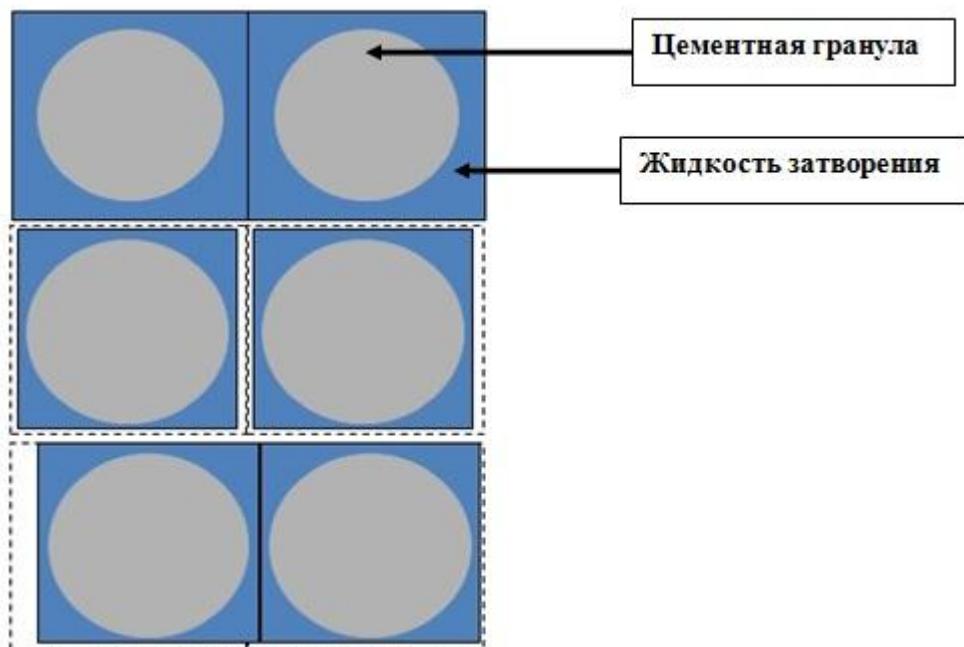


Рис. 3. Объемная усадка.  
Гранулы увеличиваются, выделенный объем уменьшается



Рис. 4. Ячейка для определения усадки цементного камня по API 10B-5

отнести хорошую точность в случае, когда цементный камень расширяется. Ячейка не герметична, поэтому в нее можно поместить любую среду, чтобы исследовать ее действие на цемент. Недостатком является некорректное измерение усадки цементного камня. Это происходит из-за технологической особенности ячейки: цемент попадает в прорезь гибкого кольца, и впоследствии не дает этому кольцу сходиться [5].

Предлагаемый нами метод определения объемной усадки цементного камня заключается в измерении скорости прохождения жидкости или газа через зазор между цементным камнем и стенкой ячейки прибора, образовавшийся в результате объемной усадки. Схематически опыт показан на Рис 5. В данном методе используется стандартная и широко распространенная ячейка для измерения водоотдачи по стандарту API RP 10B-2 [5].



Рис. 5. Новый метод определения усадки

Измерив расход, можно определить размеры зазора, и вычислить усадку в процентах. Для вычисления размеров зазора по расходу жидкости используется формула Пуазейля для кольцевого канала [4]:

$$Q = \frac{\pi(p_2 - p_1)}{8vL} \left\{ R_2^4 - R_1^4 - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln(R_2/R_1)} \right\}, \quad (1)$$

а для вычисления размеров зазора по расходу газа — формула [4]:

$$Q = \frac{\pi M(p_2^2 - p_1^2)}{16\eta RTL} \left\{ R_2^4 - R_1^4 - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln(R_2/R_1)} \right\}. \quad (2)$$

В этих формулах  $Q$  — расход жидкости или газа,  $p_1$  — давление на выходе из ячейки,  $p_2$  — давление на входе в ячейку,  $v$  — кинематическая вязкость жидкости,  $\eta$  — динамическая вязкость газа,  $R_2$  — внутренний радиус ячейки,  $R_1$  — внешний радиус образца,  $L$  — длина образца,  $M$  — молярная масса газа,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — температура газа ( $K$ ).

Данный метод достаточно просто реализовать в лаборатории. В качестве ячейки подойдет обычная ячейка для теста на водоотдачу по API 10B-5. С помощью редуктора можно регулировать разность давлений. Вязкости жидкости и газа при известных условиях — табличные величины, расход измеряется стандартным прибором. Использовать необходимо химически инертные к цементу вещества.

Вычислить  $(R_2 - R_1)$  из формул (1) и (2) можно с помощью любой стандартной процедуры для решения трансцендентных уравнений, например, из пакетов MAPLE [3], EXCEL, или Фортран [7]; при этом вычисления надо проводить с повышенной точностью (не менее, чем 12 знаков после запятой).

### Результаты экспериментов

Для проверки нового метода определения усадки цементного камня были проведены эксперименты со стандартными тампонажными системами. Была измерена усадка тяжелого раствора с плотностью 1 900 кг/м<sup>3</sup> и облегченного раствора с плотностью 1 600 кг/м<sup>3</sup>. Измерялся расход азота и керосина. Для решения уравнений (1) и (2) использовались следующие константы:  $M = 0,028$  кг/моль (азот),  $\eta = 1,79 \cdot 10^{-5}$  Па·с (азот),  $v = (2,0 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (керосин),  $p_1 = 10^5$  Па,  $R_2 = 25,40 \pm 0,01$  мм,  $L = 150 \pm 0,01$  мм. Результаты экспериментов представлены в Таблице 1.

Как видно из таблицы, для легкого цемента результаты измерений по скорости фильтрации керосина и азота при различных давлениях, в пределах погрешности, совпадают между собой. Разброс значений по фильтрации азота

Таблица 1

## Результаты экспериментов

Тампонажный раствор	Фильтруемое вещество	Давление $p_2$ , psi (МПа)	Скорость фильтрации, мл/мин	$R_2 - R_1$ , мкм	Линейная усадка, $10^{-3}\%$
Тяжелый 1 900 кг/м <sup>3</sup>	Азот	400 (2,76)	0,95±0,09	0,45±0,09	1,8±0,4
		200 (1,38)	0,09±0,02	0,33±0,08	1,3±0,4
	Керосин	700 (4,83)	0,00±0,01		
Легкий 1 600 кг/м <sup>3</sup>	Азот	100 (0,69)	78±6	5,0±0,6	20±3
		200 (1,38)	254±20	4,7±0,6	19±3
	Керосин	100 (0,69)	0,32±0,01	5,4±0,4	21±2
		200 (1,38)	0,94±0,01	6,0±0,4	24±2
		300 (2,07)	1,47±0,05	6,0±0,4	24±2

несколько выше; это можно объяснить тем, что из-за сжимаемости газа в процессе фильтрации его температура меняется, что не учитывается формулой (2). У тяжелого раствора цемента усадка оказалась настолько малой, что даже при максимальном давлении на входе в ячейку фильтрацию керосина измерить не удалось. Фильтрацию азота измерить удается, но из-за малой скорости фильтрации относительная погрешность измерений велика, и результаты измерений при разных давлениях согласуются между собой только качественно.

Для проверки было произведено независимое измерение объема канала. Масса ячейки с затвердевшим камнем легкого цемента была измерена с помощью весов с точностью до 0,01 грамма. Затем кольцевой канал между ячейкой и образцом цемента был насыщен керосином, и масса ячейки определена повторно. Разница составила  $0,11\pm0,01$  г, т. е. объем канала оказался равным  $V = 0,14\pm0,02$  см<sup>3</sup>. Зазор  $R_2 - R_1$  был вычислен по формуле

$$R_2 - R_1 = R_2 - \sqrt{R_2^2 - V / \pi L} ;$$

величина  $R_2 - R_1$  составила  $5,85\pm0,5$  мкм, что хорошо согласуется с результатами, приведенными в таблице.

### Выводы

Предлагаемый нами метод определения усадки легкого цемента показывает хорошую сходимость экспериментов, и, по нашему мнению, может применяться на практике. При измерениях более точные результаты дает фильтрация жид-

кости, т. к. при этом выше точность измерения скорости потока, проходящего через установку. Кроме того, благодаря малой сжимаемости жидкости можно пренебречь изменением ее температуры в процессе фильтрации.

Цементные растворы, имеющие большую плотность, т. е. большую долю твердых частиц, менее склонны к объемной усадке. Для таких растворов цемента предлагаемый нами метод дает только качественные результаты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басарыгин Ю. М. Заканчивание скважин / Ю. М. Басарыгин, А. И. Булатов, Ю. М. Проселков. Недра, 2000, 668 с.
2. Булатов А. И. Газопроявления в скважинах и борьба с ними / А. И. Булатов, В. И. Рябченко, И. Л. Сибирка, Н. А. Сидоров. М.: Недра, 1969. 278 с.
3. Дьяконов В. П. Математическая система Maple V R3/R4/R5 / В. П. Дьяконов. М.: СОЛОН, 1988.
4. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Наука, 1986. 736 с.
5. Методики проведения экспериментов с тампонажными растворами. API RP 10B-5. API, 2010, 24 с.
6. Сухачев В. Ю. Миграция пластовых газов через цементный раствор / В. Ю. Сухачев // Теплофизика, гидродинамика, теплотехника: сборник статей, вып. 6. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2013. С. 217-222.
7. Форсайт Дж. Машины методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер. М.: Мир, 1980.
8. Nelson E. B.. Well Cementing / Erik B. Nelson, D. Guillot; 2<sup>nd</sup> edition. Daigrafiks, 2006. 774 pp.

**Anatoliy A. KISLITSYN<sup>1</sup>**  
**Vasiliy Yu. SUKHACHEV<sup>2</sup>**

## **DETERMINATION OF CEMENT SHRINKAGE IN LABORATORY CONDITIONS<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,  
Head of Department of Micro- and Nanotechnologies,  
Tyumen State University  
akislicyn@utmn.ru

<sup>2</sup> Postgraduate Student,  
Department of Micro- and Nanotechnologies,  
Tyumen State University;  
Leading Engineer, Schlumberger Ltd  
vasya@suhachev.com

### **Abstract**

The article suggests a method for determining the volume shrinkage of cement slurry. It involves measuring velocity of fluid or gas filtration through a gap between the cement stone and the wall of the device cell formed as a result of volume shrinkage. A standard and widespread cell is used for water loss measurement according to API RP 10B-2. The experiments were carried out with the standard cementing slurries. The shrinkage of heavy cement slurry with the density of 1 900 kg/m<sup>3</sup> and the shrinkage of light cement slurry with the density of 1 600 kg/m<sup>3</sup> were determined. The flowrates of nitrogen and kerosene were measured. It is shown that for light cement slurries the suggested method shows good agreement between the experiments and can be applied in practice. For heavy cement slurries the suggested method gives only qualitative results.

### **Keywords**

Cement slurry, gas migration, bulk shrinkage, chemical shrinkage, cement stone, cement shrinkage.

---

<sup>1</sup> The research has been carried out with the support of the scientific school SS-6987.2016 (under the supervision of R. I. Nigmatulin).

**Citation:** Kislitsyn A. A., Sukhachev V. Yu. 2016. "Determination of Cement Shrinkage in Laboratory Conditions." Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 1, pp. 42–51.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-42-51

**DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-42-51**

## REFERENCES

1. API. 2010. Metodiki provedeniya eksperimentov s tamponazhnymi rastvorami [Methods of Conducting Experiments with Cement Slurries]. API RP 10B-5.
2. Basarygin Yu. M., Bulatov A. I., Proselkov Yu. M. 2000. Zakanchivanie skvazhin [Well Completion]. Moscow: Nedra.
3. Bulatov A. I., Ryabchenko V. I., Sibirka I. L., Sidorov N. A. 1969. Gazoproyavleniya v skvazhinakh i borba s nimi [Gas Signs in Wells and Their Control]. Moscow: Nedra.
4. Dyakonov V. P. 1988. Matematicheskaya sistema Maple V R3/R4/R5 [Mathematical system Maple V R3/R4/R5]. Moscow: SOLON.
5. Forsythe J., Malcolm M., Moler K. 1980. Mashinnye metody matematicheskikh vychislenii [Computer Methods for Mathematical Computations]. Moscow: Mir.
6. Landau L. D., Lifshits E. M. 1986. Teoreticheskaya fizika. Gidrodinamika [Theoretical physics. Hydrodynamics]. Moscow: Nauka.
7. Nelson Erik B., Guillot Dominique. 2006. Well Cementing. 2<sup>nd</sup> edition. Daigrafiks.
8. Sukhachev V. Yu. 2013. “Migratsiya plastovykh gazov cherez tsementnyi rastvor” [Migration of Formation Gases through Cement Slurry]. In: Teplofizika, gidrodinamika, teplotekhnika: sbornik statei, no 6, pp. 217-222. Tyumen: Tyumen State University.