

## **СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НИЗКОЧАСТОТНОМ ВИБРОВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В НЕФТЕНАСЫЩЕННОМ ОБРАЗЦЕ**

*Дмитрий Сергеевич Евстигнеев*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, научно-инженерный центр горных машин и геотехнологий, тел. (983)127-88-52, e-mail: dima503@pochta.ru

*Андрей Владимирович Савченко*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, научно-инженерный центр горных машин и геотехнологий, тел. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

Приведены результаты статистической обработки экспериментальных данных по изучению фильтрационных процессов в отдельном геоблоке при низкочастотном виброволновом воздействии. По количественным данным объемов флюидов, прокачанных через пористый гидрофильный образец, построены регрессионные уравнения. Анализ полученных зависимостей позволил определить время прорыва водной фазы и количественно подсчитать дополнительный прирост дебита нефти при низкочастотном виброволновом воздействии. Показано образование капиллярно запертых целиковых зон в гидрофильном пористом образце.

**Ключевые слова:** двухфазная фильтрация, геоблок, виброволновое воздействие, целиковые зоны.

## **STATISTICAL PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA ON INVESTIGATION INTO FILTRATION PROCESSES UNDER LOW-FREQUENCY VIBRATION-WAVE EFFECT ON AN OIL-SATURATED SPECIMEN**

*Dmitry S. Evstigneev*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Junior Researcher of Mining Machinery and Geotechniques Research Center, tel. (983)127-88-52, e-mail: dima503@pochta.ru

*Andrey V. Savchenko*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., Mining Machinery and Geotechniques Research Center, tel. (923)245-75-50, e-mail: sav@eml.ru

The results of statistical processing of experimental data on investigation into filtration processes in a discrete geoblock under low-frequency vibration-wave effect are reported. Regression equations are plotted based on quantitative data on fluid volumes pumped through a porous hydrophilic specimen. The analysis of the resultant relationships enabled to determine time of the water phase rupture and to evaluate quantitatively an oil yield increment under the low-frequency vibrowave effect. The formation of capillary-closed block zones in the hydrophilic porous specimen is demonstrated.

**Key words:** two-phase filtration, geoblock, vibrowave effect, pillar zones.

Мировые промышленные гиганты и энергетический комплекс требуют все больше топлива в виде нефти, угля, газа и поэтому сырьевые компании стремятся увеличить их добычу. Ученые всех стран признают, что нефтяные месторождения истощены, а потребление угля сильно ухудшает экологию Земли и отрицательно сказывается на биосфере. Для интенсификации добычи нефти на истощенных месторождениях человек искусственно вмешивается в процесс её извлечения, стремясь увеличить как качество, так и количество добываемого полезного ископаемого. Одним из перспективных методов такого воздействия является вибросейсмическое просвечивание нефтяной залежи поверхностными или скважинными виброисточниками, преимущество которого заключается в экономической рентабельности, эргономике применения механизмов и экологической чистоте.

Из блочно-иерархической концепции строения геосред, сформулированной М.А. Садовским и развитой В.Н. Опариним [1-4] следует, что терригенные коллекторы, в нефтяном пласте, расчленены на обособленные объемы (геоблоки) макротрещинами, в которых фильтрация флюида может происходить одновременно как по матрице породы блоков, так и по межблоковым трещинам (рис. 1) [4].

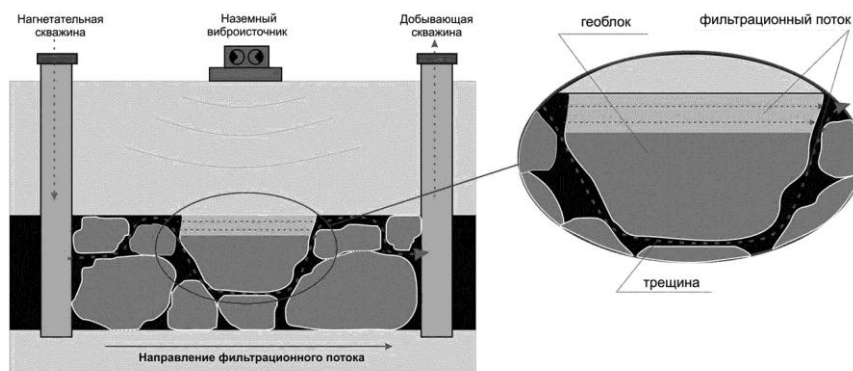


Рис. 1. Схема блочного строения нефтяного пласта

В блочной структуре нефтяного пласта рассмотрим отдельный геоблок произвольной формы окружённый по периметру лабиринтной трещиной (рис. 1). Будем предполагать, что по трещине движется преимущественно водная фаза, и, следовательно, давлению в водной фазе противостоит давление в капиллярах на границе геоблок-трещина. Капиллярное давление является функцией от нефтенасыщенности, и оно будет определять размеры целиковой зоны формирующейся в геоблоке после прорыва водной фазы.

Для проведения экспериментов по влиянию направленного низкочастотного виброволнового воздействия на процесс фильтрации в единичном блоке был подготовлен гидрофильный пористый образец в форме параллелепипеда, размеры которого 12x10,5x6,3 см, с размещенным в нём вибратором, в качестве которого был использован сейсмодатчик GMT-12.5 (собственная частота колебаний 12,5 Гц). По периметру образца организована лабиринтная трещина по которой движется вода, так как показано на рис. 2.

Пропитанный маслом, недорогим заменителем нефти, пористый образец помещён в специальную камеру, в которой организована лабиринтная трещина. На нагне-

тательной стороне образца действует гидростатическое давление  $P_2=22540$  Па, а на эксплуатационной стороне через штуцер в мерную колбу при атмосферном давлении ( $P_1=0$  Па) отбирается весь объем флюидов прошедший как через образец, так и по трещине. Фиксируется время, объем каждой из фаз и по полученным данным строятся графики временной зависимости объемов флюидов прокаченных через образец.

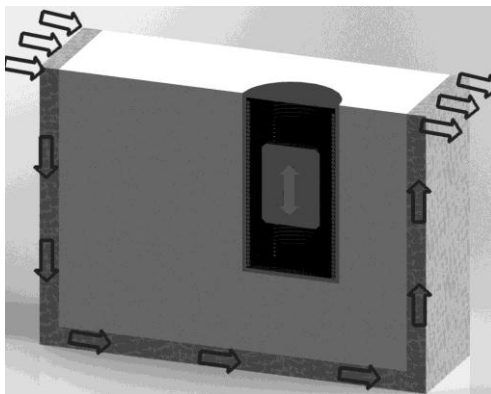


Рис. 2. Схема размещения вибратора внутри геоблока, обтекаемого водой

На рис. 3 сведены данные временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец по четырем экспериментам, которые условно можно разделить, по времени, на три группы.

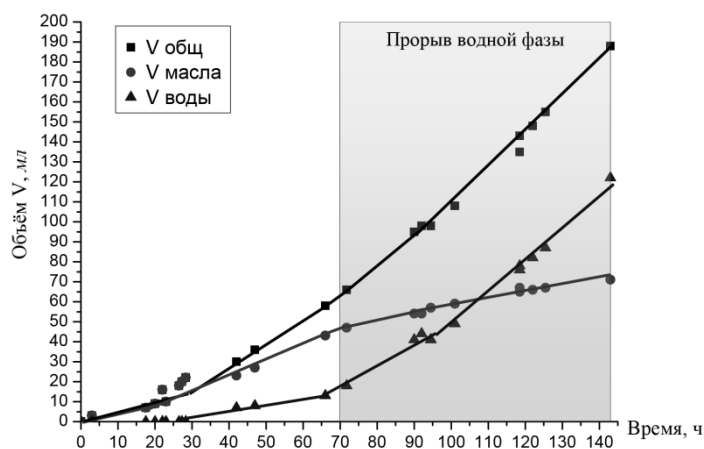


Рис. 3. Графики временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец (объединены результаты экспериментов, полученных на 4-х образцах)

К первой группе отнесем данные по регистрации объемов флюидов с 0 по 30 часов. За это время происходит вытеснение масла по трещине, окружающей геоблок. Поскольку плотность масла меньше плотности воды, то первым из выходного патрубка вытекает масло, а затем появляются следы воды. Осложняет процесс регистрации необходимость учета объем флюидов, требуемых для заполнения пространства трещины и патрубка. В этом временном промежутке кривая общего объема, прокаченного через образец с окружающей его трещиной, имеет изгиб. Поскольку интерес

представляет формирование целиковых зон в геоблоке, то на данном временном интервале, с учетом провиденных особенностей, эти данные по объемам в дальнейшем анализе рассматриваться не будут.

Ко второй группе отнесем данные по регистрации объемов флюидов с 30-го по 70-й час. В этом временном интервале идет фильтрация масла и воды в геоблоке, которая заканчивается прорывом водной фазы. Время прорыва предстоит определить из регрессионного анализа.

Наконец, к третьей группе относятся данные по регистрации объемов флюидов после прорыва водной фазы. Главным образом к этой группе будут относиться данные по регистрации объемов флюидов, полученные при активном вибровоздействии.

Построим линейные уравнения регрессии по эмпирическим данным для временного диапазона с 42-го по 72-й час, рис. 4.

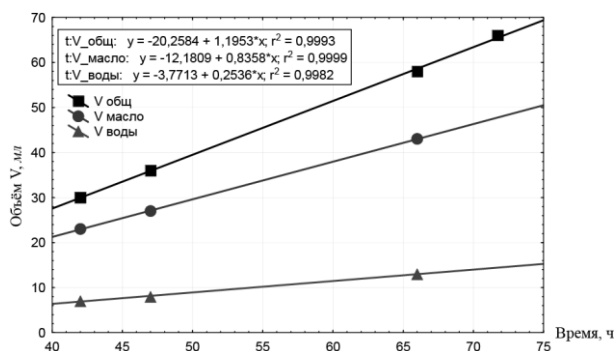


Рис. 4. Экспериментальные данные временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец и построенные по ним уравнения линейной регрессии

Коэффициенты детерминации  $r^2$  во всех линейных регрессионных моделях близки к единице (рис. 4), т.е. в случае стационарной фильтрации объёмы флюидов прокачиваемые через систему геоблок-трещина линейно зависимы от времени.

Для временного диапазона с 70-го по 142-й час коэффициенты детерминации  $r^2$  в линейных регрессионных уравнениях составляют 0,97-0,986, рис. 5 (пунктирным линиям соответствует доверительный 95%-й интервал).

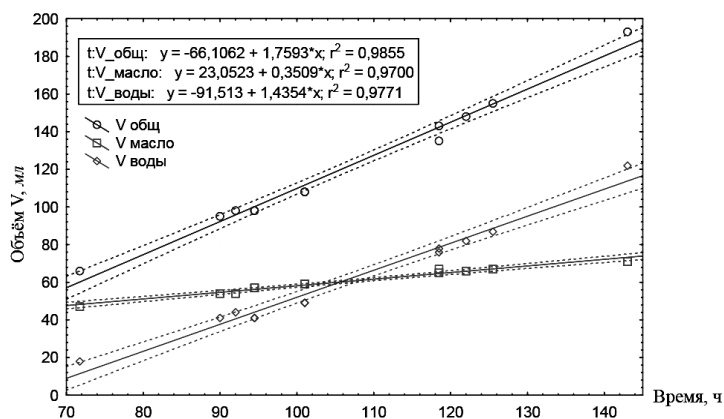


Рис. 5. Экспериментальные данные временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец и построенные по ним уравнения линейной регрессии

Объединяя два временных интервала на одном графике и строя соответствующие уравнения регрессий для каждого из интервалов, можно вычислить время прорыва водной фазы  $t_{np} = 70$  часов, рис. 6.

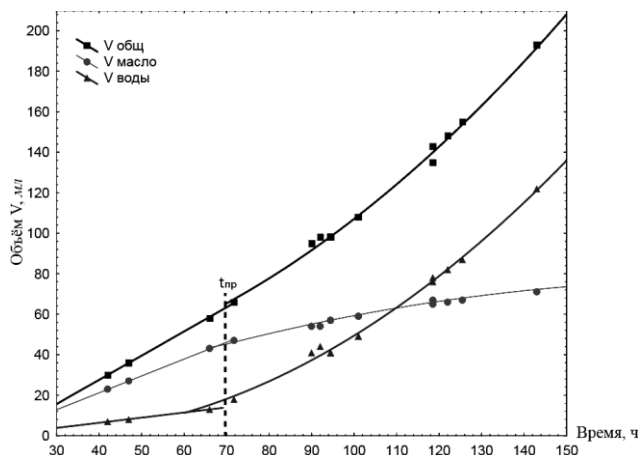


Рис. 6. Графики временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец с 30-го по 150-й час

В эксперименте без вибровоздействия прирост масла начиная с 66-го по 93-й час составил 7 мл или 0,26 мл/ч, причем с 90-го по 93-й час масло не вытеснялось вовсе, рис. 7. Сформировавшиеся целиковые зоны можно увидеть, распилив образец вдоль общего фильтрационного потока, так как показано на рис. 8 [5].

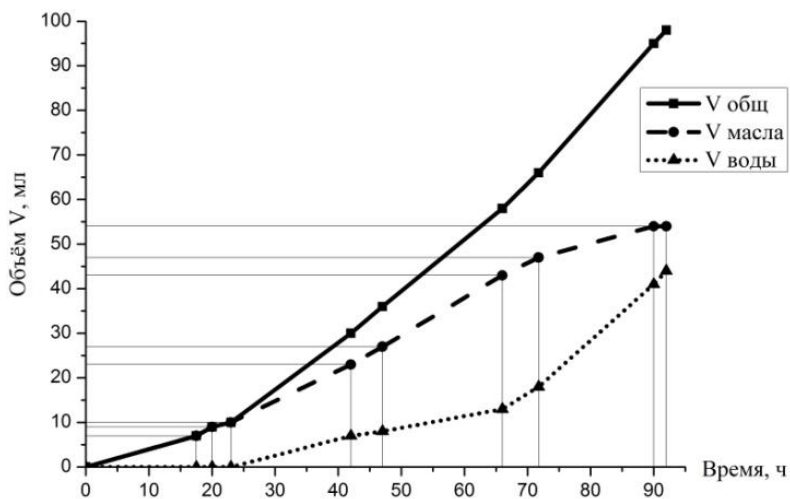


Рис. 7. Графики временной зависимости объемов флюидов, прокаченных через образец без вибровоздействия

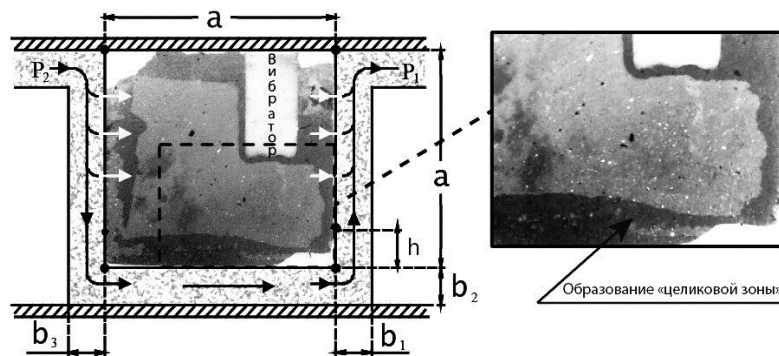


Рис. 8. Схема размещения образца в камере и результат распила после прорыва водной фазы. Светлый фон – водная фаза, тёмный – масло. (Всего масла в образце 177,45 г, добыто масла из образца 44,65 г, 74,8% масла осталось в образце,  $h=11\div 15$  мм)

Заключение. Образующиеся в процессе вытеснения целики со временем уменьшаются в размерах и частично вовлекаются в поток. Направленное низкочастотное виброволновое воздействие способствует их наискорейшему разрушению и вовлечению в общий фильтрационный поток. На этапе вытеснения масла водой до момента прорыва из системы геоблок-трещина объемный расход вытесненного масла составил 0,84 мл/ч. После прорыва водной фазы, начиная с 70-го часа, при активном вибровоздействии объемный расход вытесненного масла составил уже 0,37 мл/ч, т.е. в 2,3 раза меньше. Без вибровоздействия объемный расход был равен 0,26 мл/ч. Таким образом вибровоздействие ускорило процесс вытеснения масла из геоблока на 0,11 мл/ч, т.е. прирост составил 42% в сравнении с экспериментом без вибровоздействия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 15-05-08824а.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы. // ДАН СССР. Т. 247, №4. 1979. С. 829-833.
2. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г. Писаренко В.Ф. О свойстве дискретности горных пород. // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. № 12. 1982. – С. 3-19.
3. Опарин В.Н., Юшкин В.Ф., Акинин А.А., Балмашнова Е.Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ, ИГД СО РАН. № 5. 1998. – С. 16-33.
4. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях / Опарин В.Н., Симонов Б.Ф., Юшкин В.Ф. [и др.]. – Новосибирск: Наука, 2010. 404 с.
5. Евстигнеев Д. С., Симонов Б. Ф., Савченко А. В. Экспериментальное исследование фильтрационных процессов при низкочастотном виброволновом воздействии в нефтенасыщенном образце // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 95–101.

© Д. С. Евстигнеев, А. В. Савченко, 2017