

---

---

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА,  
ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ**

---

---

УДК 532.5;532.517;532.517.6

**УСИЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ  
ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ СРЕДУ  
ПУТЕМ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**© 2020 г. А. С. Корнеев<sup>1,\*</sup>, С. Р. Ганиев<sup>1</sup><sup>1</sup> *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**\*e-mail: korneev47@gmail.com*

Поступила в редакцию 29.10.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Проведено экспериментальное исследование процесса фильтрации воды через пористую среду в условиях воздействия волн, создаваемых гидродинамическим генератором колебаний. Получены амплитудно-частотные характеристики генератора при различных расходах воды через этот генератор. Найдено оптимальное значение расхода, при котором достигается наибольшая скорость фильтрации. Полученные результаты можно использовать при проектировании гидродинамических генераторов колебаний технологического назначения.

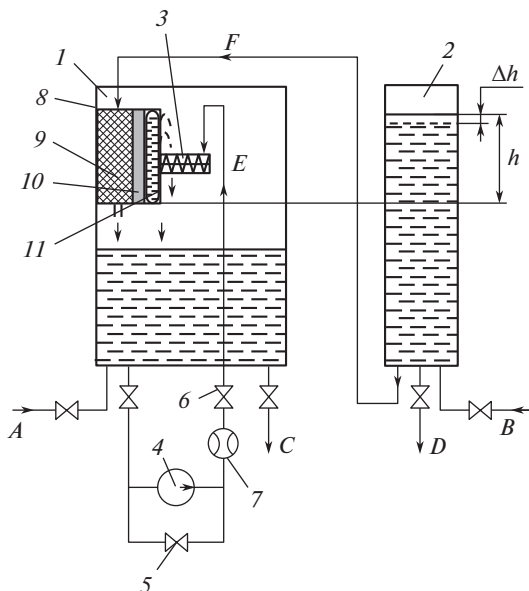
*Ключевые слова:* фильтрация, пористая среда, гидродинамический генератор колебаний, эксперимент

**DOI:** 10.31857/S0235711920040082

Задача ускорения фильтрации через пористые среды актуальна для нефтедобычи [1–3] и для ряда технологических процессов, например, пропитки пористых материалов жидкостями [4]. Одним из перспективных способов ее решения является волновая обработка пористой среды гидродинамическими генераторами колебаний [1, 5]. Для разработки таких генераторов необходимы как расчетные, так и экспериментальные исследования.

**Экспериментальная установка** (рис. 1) содержала рабочую камеру 1 (с внутренним диаметром 440 мм) и камеру для подачи воды 2 (с внутренним диаметром 240 мм).

Камеры были выполнены из органического стекла для обеспечения возможности визуальных наблюдений. Водопроводная вода заливалась в камеры по магистралям *A* и *B*. Ее слив по окончании эксперимента осуществлялся через магистрали *C* и *D*. Непрерывная циркуляция воды через волновой генератор 3 производилась с помощью насоса 4 по магистрали *E*. Регулировка расхода воды через генератор осуществлялась с помощью вентиля байпаса 5 и регулировочного вентиля 6. Измерение расхода производилось с помощью расходомера 7 (ротаметра). Исследуемое устройство содержало корпус 8, в который помещалась пористая среда 9, герметизируемая гибкой мембраной 10. Волновой генератор 3 устанавливался в крышке устройства 11, имевшей отверстия для выхода воды. Подача воды к устройству осуществлялась самотеком из камеры 2 по магистрали *F*. Измерение расхода воды через пористую среду производилось объемным методом, путем измерения времени понижения начального уровня воды  $h$  на заданную величину  $\Delta h$ . Типичное значение высоты столба воды равнялось  $h = 700$  мм, понижение уровня за время эксперимента  $\Delta h = 8$  мм, что составляло лишь 1.1% от начального значения. В качестве волнового генератора использовался вихре-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – камера большая, 2 – камера малая, 3 – волновой генератор, 4 – насос, 5 – вентиль байпаса, 6 – вентиль регулировки расхода, 7 – расходомер, 8 – корпус, 9 – пористый материал, 10 – мембрана, 11 – крышка.

вой гидромассажер аксиально-тангенциального типа [6]. Для измерения пульсаций давления использовался пьезоэлектрический датчик типа 701A фирмы “Кистлер”. Запись и обработка спектров проводилась с помощью осциллографа “Лекрой WaveSurfer MXs-B”. Характеристики генератора колебаний были получены в предварительных экспериментах. При этом датчик давления был установлен на расстоянии 3 мм от среза сопла генератора, вдоль его оси симметрии.

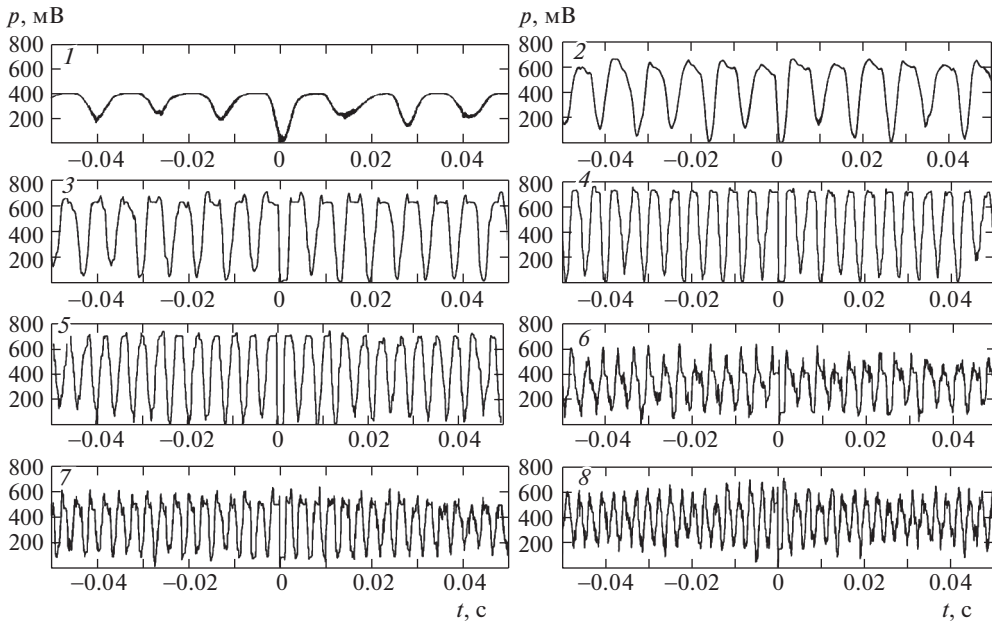
В настоящей статье в качестве пористой среды использовался промышленный пенополиуретан (поролон стандартный марки *ST*). В то же время, разработанная методика позволяет исследовать и другие пористые материалы.

**Характеристики волнового генератора.** В процессе исследований были получены зависимости давления на выходе из генератора от времени (рис. 2).

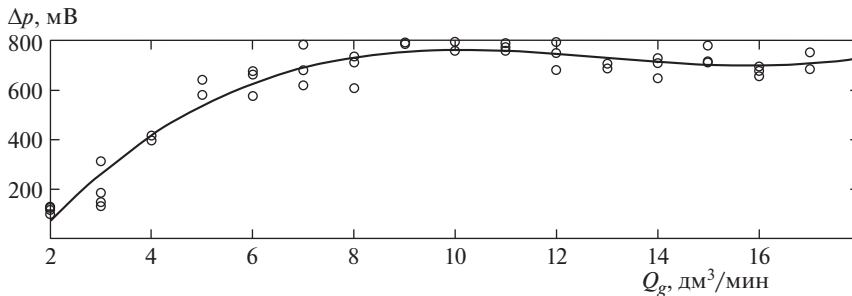
Давление представлено в единицах шкалы осциллографа – в милливольтгах. Наиболее заметное перестроение зависимости  $p(t)$  происходит при увеличении расхода воды через генератор  $Q_g$  в диапазонах от 4 до 8 и от 12 до 14  $\text{дм}^3/\text{мин}$ . С ростом расхода воды  $Q_g$  размах колебаний давления  $\Delta p = p_{\max} - p_{\min}$  сначала заметно увеличивается, а затем изменяется слабо (рис. 3). Это связано с особенностями конструкции использованного волнового генератора.

Путем разложения данных рис. 2 в ряд Фурье были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) волнового генератора (рис. 4).

С увеличением расхода воды через генератор  $Q_g$  увеличивалась частота, соответствующая максимальной амплитуде колебаний. В то же время, эта максимальная амплитуда достигала наибольшего значения при расходе воды  $Q_g = 10 \text{ дм}^3/\text{мин}$  (рис. 5.)



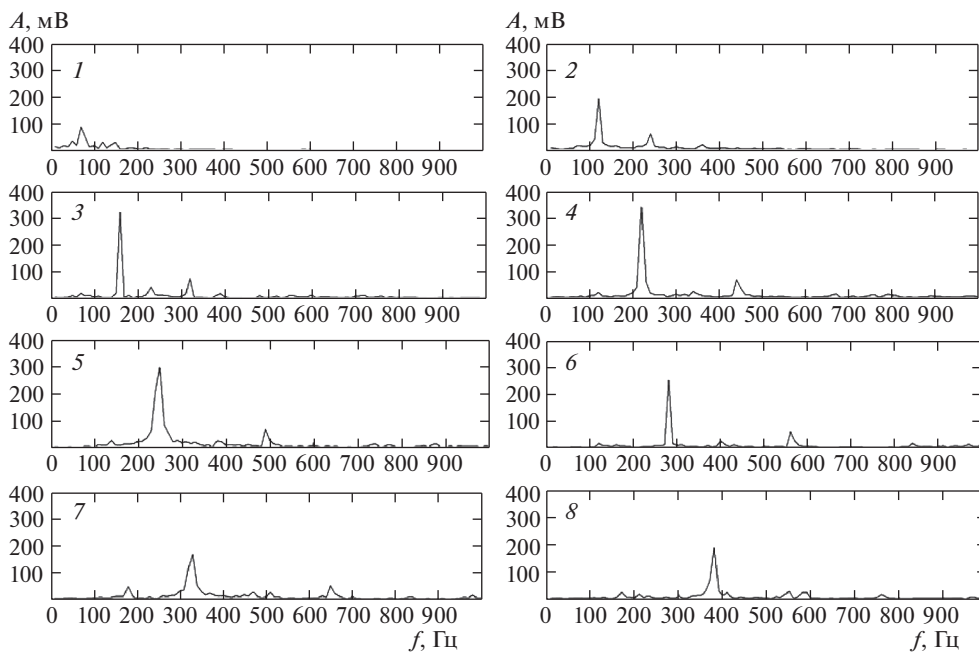
**Рис. 2.** Зависимости давления на выходе из генератора  $p$  от времени  $t$  при различных расходах воды через генератор  $Q_g$ : 1 –  $Q_g = 4$  дм<sup>3</sup>/мин; 2 –  $Q_g = 6$  дм<sup>3</sup>/мин; 3 –  $Q_g = 8$  дм<sup>3</sup>/мин; 4 –  $Q_g = 10$  дм<sup>3</sup>/мин; 5 –  $Q_g = 12$  дм<sup>3</sup>/мин; 6 –  $Q_g = 14$  дм<sup>3</sup>/мин; 7 –  $Q_g = 16$  дм<sup>3</sup>/мин; 8 –  $Q_g = 18$  дм<sup>3</sup>/мин.



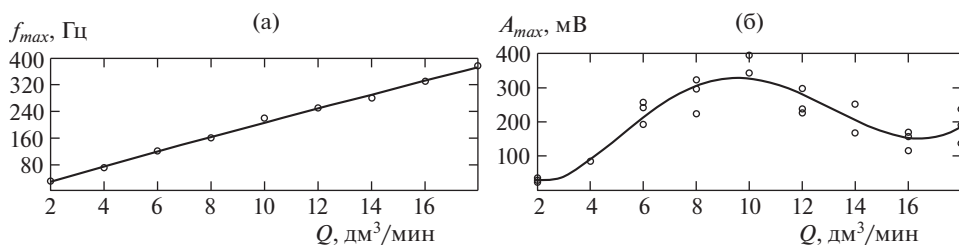
**Рис. 3.** Размах колебаний давления на выходе из волнового генератора в зависимости от расхода воды.

**Скорость фильтрации.** С увеличением расхода воды через волновой генератор  $Q_g$  наблюдалось возрастание расхода воды через пористый материал  $Q_p$  (рис. 6).

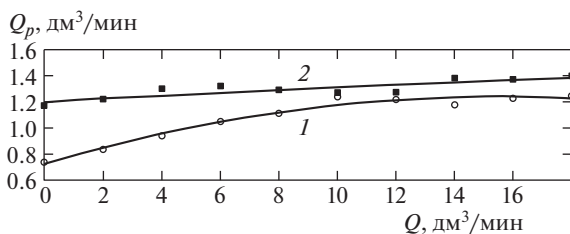
При этом максимальное увеличение скорости фильтрации по сравнению со случаем выключенного генератора ( $Q_g = 0$ ) составило около 80% для нового материала (рис. 6, линия 1) и до 20% для повторно использованного (рис. 6, линия 2). Это показывает, что основным механизмом увеличения расхода жидкости через пористый материал при волновом воздействии в данном случае является прочистка пор этого материала от имевшихся загрязнений. После завершения прочистки волновое воздействие на расход жидкости через пористый материал становится значительно слабее.



**Рис. 4.** Амплитудно-частотные характеристики волнового генератора при различных расходах воды через генератор  $Q_g$ : 1 –  $Q_g = 4$  дм<sup>3</sup>/мин; 2 –  $Q_g = 6$  дм<sup>3</sup>/мин; 3 –  $Q_g = 8$  дм<sup>3</sup>/мин; 4 –  $Q_g = 10$  дм<sup>3</sup>/мин; 5 –  $Q_g = 12$  дм<sup>3</sup>/мин; 6 –  $Q_g = 14$  дм<sup>3</sup>/мин; 7 –  $Q_g = 16$  дм<sup>3</sup>/мин; 8 –  $Q_g = 18$  дм<sup>3</sup>/мин.



**Рис. 5.** Зависимость резонансной частоты  $f_{max}$  (а) и амплитуды главного максимума  $A_{max}$  колебаний давления на выходе из генератора (б) от расхода воды через генератор  $Q_g$ .



**Рис. 6.** Зависимость расхода воды через пористый материал  $Q_p$  от расхода воды через волновой генератор  $Q_g$  для нового материала (1) и для повторно использованного материала (2).

**Заключение.** Получены экспериментальные характеристики волнового генератора колебаний аксиально-тангенциального типа при различных расходах воды через генератор. Показано, что у данного генератора размах колебаний давления между их максимальными и минимальными значениями при увеличении расхода воды сначала увеличивается, а затем изменяется слабо. На амплитудно-частотных характеристиках заметно выделяется один главный максимум, частота которого при увеличении расхода воды монотонно увеличивается. В то же время, в зависимостях амплитуд этого максимума от расхода воды имеется максимум при расходе воды через генератор, составляющий 10 дм<sup>3</sup>/мин. Волновое воздействие на пористую среду привело к возрастанию скорости фильтрации воды через эту среду до 80% (по сравнению со случаем отсутствия волнового воздействия) для нового материала и до 20% для повторно применяемого. Полученные результаты можно использовать при проектировании волновых генераторов различного назначения, связанных с фильтрационными процессами через пористые среды.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ganiev R.F., Ukrainski L.E.* Nonlinear wave mechanics and oscillatory phenomena on the basis of high technologies: Begell house, Inc.Publishers USA, 2012. 527 p.
2. *Abramov O.V., Abramov V.O., Myasnikov S.K., Mullakaev M.S.* Extraction of bitumen, crude oil and its products from tar sand and contaminated sandy soil under effect ultrasound. 11-th Meeting of the European Society of Sonochemistry. (June 1–5, 2008) La grande – Motte, France. P. 176.
3. *Marfin E.A., Kravtsov Y.I., Abdrashitov A.A., Metelev I.S.* Intensification of Oil Production Under Vibration Impact on the Producing Formation // Geomodel 2015 – 17th science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development: September 07-10, 2015, Gelendzhik, Russia.  
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.201413912>
4. *Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В. и др.* Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. 203 с.
5. *Авдеевский В.С., Ганиев Р.Ф., Калашников Г.А. и др.* Гидродинамический генератор колебаний: Патент 2015749 РФ // Б.И. 1994. № 13. С. 34.
6. *Ganiev R.F., Korneev A.S.* Wave Hydro Massagers // Journal of machinery manufacture and reliability, 2014. V.43. № 4. P. 319.