

А. С. Бесов^{1,2}, С. В. Головин^{1,2}, В. В. Неверов¹, Е. И. Пальчиков^{1,2},
А. В. Долгих^{1,2}, М. С. Самойленко¹*

Сравнение оптических и рентгеновских методов исследования оседания проппанта в геле

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: palchikov@hydro.nsc.ru

Аннотация. Частицы проппанта, взвешенные в геле, применяются при нефтедобыче в технологии гидроразрыва пласта. Динамика частиц при транспортировке по трубам и в трещине представляет интерес. В работе исследуется оседание частиц проппанта оптическим и рентгеновским методами в сшитом геле на основе водного раствора гуаровой камеди в ячейках Хеле-Шоу размером 300×300 мм толщиной 5 мм и 10 мм. Оптический метод позволяет методом PIV построить поле скоростей и структуру течений в пристеночной зоне, рентгеновский – построить распределение плотности проппанта в зависимости от времени и координаты, независимо от перекрытия частиц в поле зрения и мутности среды. Методы дополняют друг друга, позволяя извлечь больше информации об изучаемом явлении.

Ключевые слова: проппант, гель, PIV, рентгеновская съемка

A. S. Besov^{1,2}, S. V. Golovin^{1,2}, V. V. Neverov¹, E. I. Palchikov^{1,2},
A. V. Dolgikh^{1,2}, M. S. Samoylenko¹*

Comparison of Optical and X-ray Methods of Investigation of Proppant Settling in a Gel

¹ Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: palchikov@hydro.nsc.ru

Abstract. Proppant particles suspended in gel are used in oil production in hydraulic fracturing technology. The dynamics of the particles during transportation through pipes and in the fracture is of interest. In this paper we study the settling of proppant particles by optical and X-ray methods in a cross-linked gel based on an aqueous solution of guar gum in Hele-Shaw cells of 300×300 mm with thicknesses of 5 mm and 10 mm. The optical method allows the PIV method to construct the velocity field and structure of flows in the near-wall zone, the X-ray method – to construct the proppant density distribution as a function of time and coordinate, regardless of the overlap of particles in the field of view and turbidity of the medium. The methods complement each other, allowing to extract more information about the studied phenomenon.

Keywords: proppant, gel, PIV, X-ray imaging

Введение

В технологии гидроразрыва пласта (ГРП), для увеличения проницаемости призабойной зоны и стабильности выхода флюидов, созданные трещины запол-

няются проппантом – твердыми частицами диаметром 0,5 – 2 мм. Динамика доставки частиц в неньютоновской жидкости (геле) на глубину 1,5 – 3 км по трубам и дальнейшее их поведение в трещине влияет на выход нефтепродуктов и является актуальной задачей.

Изучение оседания проппанта в оптической области спектра в плоских ячейках [1] показывают агрегацию частиц, образование зон, богатых частицами. Эти зоны переносят с собой вниз большое количество жидкости, что приводит к возникновению гравитационных неустойчивостей.

В работе [2] с помощью метода ослабления гамма-излучения проводится анализ оседания частиц с мониторингом концентрации твердых частиц в различных областях цилиндрической трубки с течением времени. Гамма-источник является сложным и опасным в обращении устройством. Измерения происходят в одной точке. Нет изображения объекта. Кроме того, представляет интерес сравнение двух методик в одинаковой ячейке. Желательно плоской, имитирующей трещину в призабойной зоне.

Методы и материалы

В работе исследуется процесс оседания частиц проппанта в прямоугольных ячейках Хеле-Шоу размером 300×300 мм толщиной 5 мм и 10 мм, имитирующих трещину ГРП, в сшитом геле на основе водного раствора гуаровой камеди (рис. 1).



Рис. 1. Постановка эксперимента в оптическом и рентгеновском диапазонах излучения

На (рис. 1) показана постановка эксперимента. Ячейка располагалась на расстоянии 1,5 м от портативного импульсного рентгеновского аппарата РИСК-150 с напряжением на рентгеновской трубке 150 кВ. Рядом с фокусом рентгеновской трубки, на том же расстоянии располагалась ПЗС видеокамера Nikrobot MV-CU013-A0UC. Свинцовый коллиматор защищал камеру от излучения рентгеновской трубки. Рядом с ячейкой располагался калибровочный клин с интервалом

толщин 0–10 мм. Клин был плотно засыпан пропантом, промежутки залиты водой с гелем. За кюветой располагался плоский светодиодный экран с равномерной засветкой. Между ячейкой и экраном был оставлен зазор, в который можно было вставить плоский детектор рентгеновского излучения размером 30×40 см на основе люминофора с памятью.

Описание, принцип действия и характеристики импульсного рентгеновского аппарата РИСК-150, разработанного в ИГиЛ СО РАН, приведены в работе [3].

Наблюдение в оптической и рентгеновской областях спектра обладает своими достоинствами и недостатками. Гель является мутной средой. И хотя он слабо поглощает проходящий свет, но все частицы, даже при толщине ячейки 5 мм, не удастся увидеть (рис. 2).

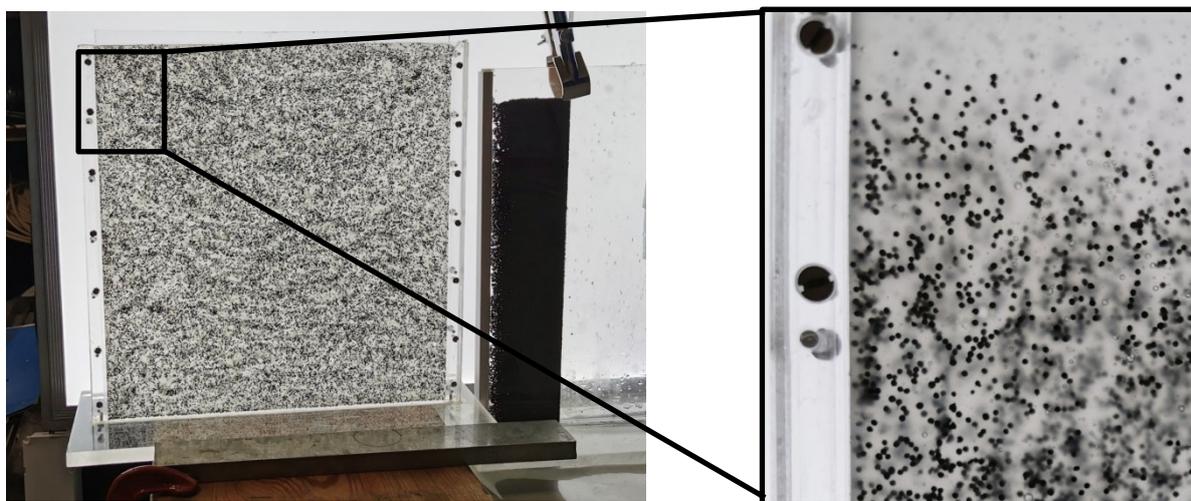


Рис. 2. Оптическое наблюдение ячейки, исходное состояние. Толщина 5 мм

Результаты

Тем не менее, для видимых частиц с резкими контурами в ближнем слое ячейки, можно методом PIV (Particle Image Velocimetry) построить поле скоростей и структуру течений (рис. 3). Однако, плотность частиц на единицу площади ячейки оптическим методом определить сложно. Это происходит не только из-за мутности среды, но и потому, что плотность может быть такая, что на пути луча оказываются две или несколько перекрывающихся частиц.

При построении поля скоростей и течений методом PIV при помощи библиотеки PIVlab пакета Matlab для видимых частиц с резкими контурами в ближнем слое ячейки (рис. 3) видно, что некоторые частицы поднимаются вверх. Скорости вычислены по видеозаписи – 1 кадр через каждые 10 с (ячейка с раскрытием 10 мм, концентрация пропанта 250 граммов на литр жидкости).

Рентгеновская методика позволяет регистрировать плотность среды независимо от агрегатного состояния, химических реакций, перекрытия объектов съемки.

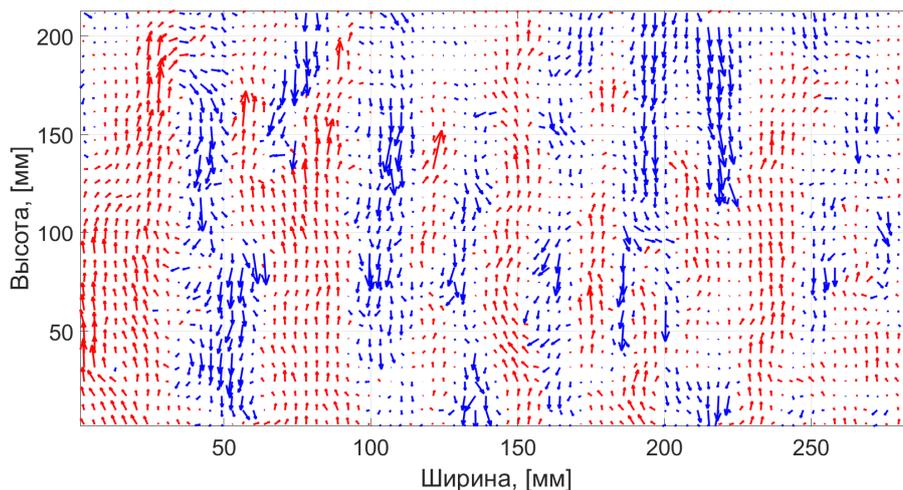


Рис. 3. Поле скоростей методом PIV. Ячейка с раскрытием 10 мм, концентрация пропанта 250 граммов на литр жидкости. 15 минут после начала эксперимента

Однако, в отличие от оптических источников, практическое отсутствие преломления и отражения для диапазона излучения выше 20 кэВ и слабого рассеяния, создание равномерного поля облучения для рентгеновского источника является сложной задачей. Рентгеновский источник, как правило, имеет размер близкий к точечному (размер фокусного пятна порядка 1 мм), на плоском детекторе изображений заметно пятно повышенной яркости, которое получается не только из-за закона обратных квадратов, но и из-за особенности диаграммы излучения рентгеновской трубки. Можно ввести компенсаторы разной толщины, выравнивающие интенсивность поля облучения, но это изменит спектр рентгеновского облучения по полю и потребует дополнительных калибровок.

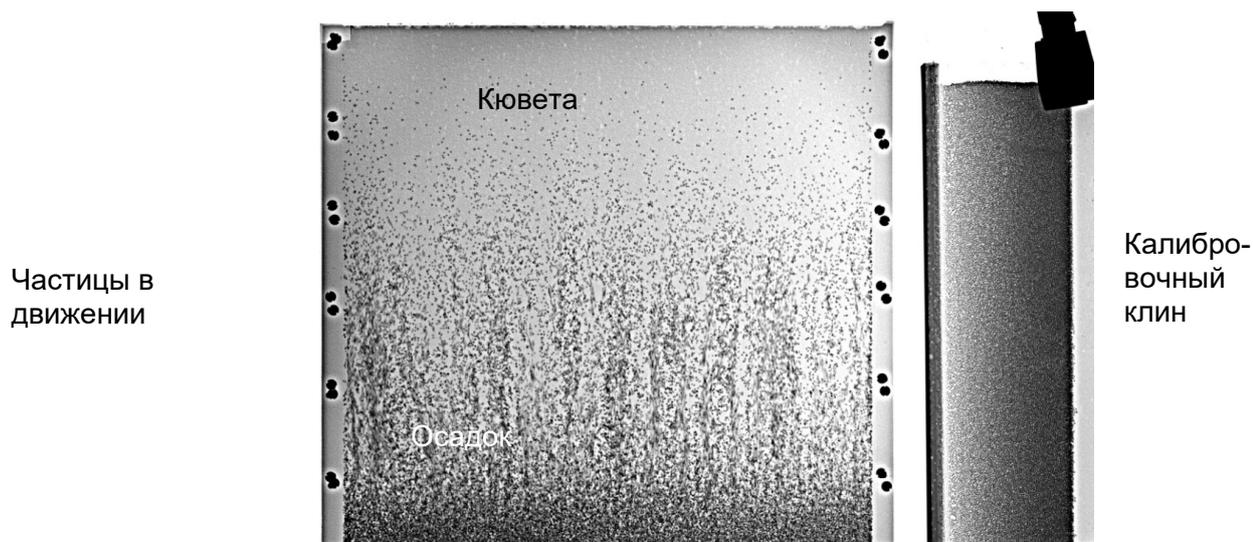


Рис. 4. Рентгеновская съемка. 30 мР, 150 кВ, РИСК-150. Ячейка с раскрытием 10 мм, концентрация пропанта 250 граммов на литр жидкости. 60 минут после начала эксперимента

В нашем случае использовался пустой кадр поля облучения на детекторе, делением на который с нужным коэффициентом, выравнивалось рентгеновское изображение ячейки с пропантом. Для калибровки по плотности применялся насыпной клин из пропанта, расположенный рядом с ячейкой. Регистрация производилась на люминофор с памятью ImagePlate на основе ВаFBr:Eu с оцифровкой на 16 разрядов (65536 градаций серого) [4, 5]. Дальнейшая обработка позволяет построить графики плотности пропанта с высотой в зависимости от времени и распределение плотности в осадке на дне (рис. 5).

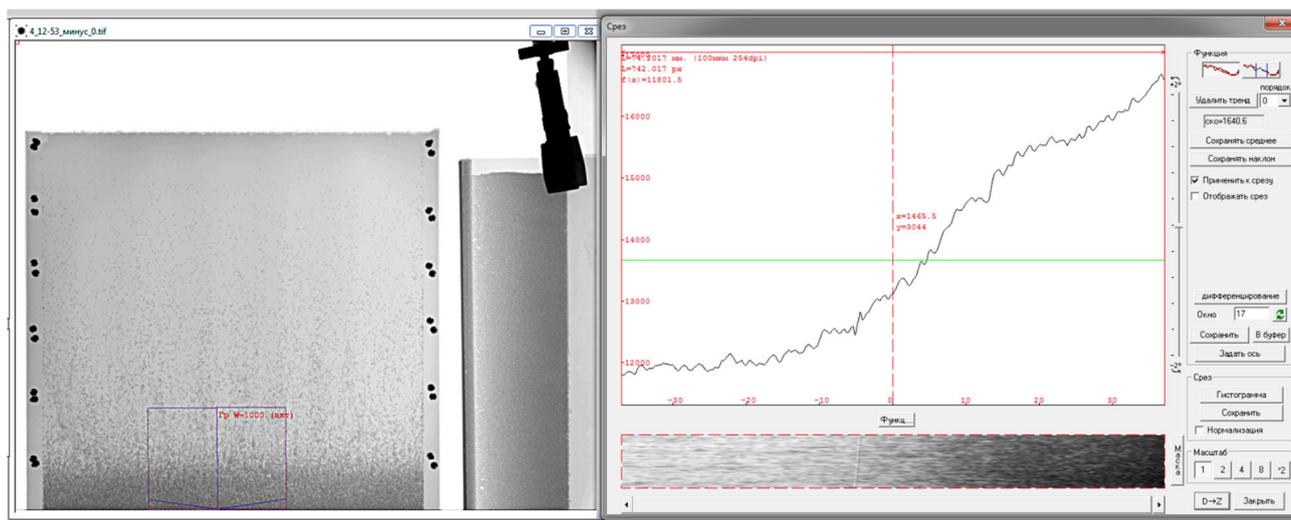


Рис. 5. Съемка в рентгеновских лучах. Плотность осадка пропанта от высоты. Ширина полосы усреднения поперек трассы (синий контур) – 1000 пикселей (100 мм)

Также стоит отметить, что в процессе оседания в неньютоновской жидкости наблюдается кластеризация пропанта в группы и образование струй (рис. 3, 4). Рентгеновская методика позволяет количественно измерить концентрации пропанта в этих образованиях.

Обсуждение

Проведенные эксперименты и данные, полученные с помощью двух разных методик, показывают, что оптическая и рентгеновская методики дополняют друг друга. Оптическая методика для видимых частиц с резкими контурами, в ближнем слое ячейки, позволяет методом PIV построить поле скоростей и структуру течений (рис. 3), выявить кластеры, струи, неоднородности течений, гидродинамические неустойчивости. Рентгеновская методика позволяет количественно измерять концентрации пропанта, регистрировать плотность кластеров и струй пропанта, строить графики плотности пропанта с высотой в зависимости от времени и распределение плотности в осадке на дне (рис. 5).

Заключение

Для видимых частиц с резкими контурами в ближнем слое ячейки, можно методом Particle Image Velocimetry построить поле скоростей и структуру течений.

Плотность частиц на единицу площади ячейки оптическим методом определить сложно. Это происходит не только из-за мутности среды, но и потому, что на пути луча оказываются две или несколько перекрывающихся частиц.

Рентгеновская методика позволяет регистрировать плотность среды – независимо от агрегатного состояния, химических реакций, перекрытия объектов съемки.

Однако, в отличие от оптических источников, создание равномерного поля облучения для рентгеновского источника является сложной задачей. Использование данных поля облучения на детекторе и цифрового метода регистрации и калибровок позволяет выравнивать рентгеновское изображение ячейки с пропантом.

В процессе оседания в неньютоновской жидкости наблюдается кластеризация пропанта в группы и образование струй. Рентгеновская методика позволяет количественно измерить концентрации пропанта в этих образованиях и в осадке на дне.

Таким образом, оптическая и рентгеновская методики дополняют друг друга, позволяя получить максимум информации и построить целостную картину изучаемого явления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S. Mora, L. Talini, and C. Allain. Structuring Sedimentation in a Shear-Thinning Fluid. *Phys. Rev. Lett.* 95, P. 088301. – Published 17 August 2005. DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.088301.
2. Bruno Arantes Moreira, Fábio de Oliveira Arouca, João Jorge Ribeiro Damasceno. Analysis of suspension sedimentation in fluids with rheological shear-thinning properties and thixotropic effects. *Volume 308, 15 February 2017, Pages 290–297.* <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591016309032?via%3Dihub>.
3. Пальчиков Е.И. Рентгеновская аппаратура и методики для диагностики динамических процессов в многофазных средах: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Новосибирск. – 2009. – 353 с., 24 табл., 166 рис. Библ. 228 наим. <http://www.dissercat.com/content/rentgenovskaya-apparatura-i-metodiki-dlya-diaagnostiki-dinamicheskikh-protsessov-v-mnogofazny>.
4. Пальчиков Е.И., Кондратьев В.И., Голиков Е.В., Черемисин А.Н. Экспериментальное исследование регистратора ВаFBr:Eu Image Plate в зависимости от дозы, спектра импульсного рентгеновского источника и числа сканирований / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – №8. – 2010. – С. 5–12.
5. E.I. Palchikov, A.V. Dolgikh, V.I. Kondratyev, and A.D. Matrosov. Spectrozoal Digital X-Ray Diagnostics of Explosive Processes, Based on ImagePlate Detectors Separated by an Absorber. – *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2013. – Vol. 77. No. 2. Pp. 99–102. – Allerton Press, Inc., 2013. ISSN 1062_8738.

© А. С. Бесов, С. В. Головин, В. В. Неверов,
Е. И. Пальчиков, А. В. Долгих, М. С. Самойленко, 2024