© И.А. Павлов, 2008

УДК 622.411.33:622.232.5

И.А. Павлов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В НАРУШЕННОМ ГОРНОМ МАССИВЕ

Семинар № 19

Движение жидкости (капельной или газообразной) через зоны обрушения, выработанные пространства, бутовые полосы, бункеры и рудоспуски, заполненные рудой, трещины гидроразрыва в окрестности скважин и др. отличается от классического фильтрационного движения тем, что даже при незначительных перепадах давления и дебитах наблюдается заметное действие как вязкостных, так и инерционных сил.

Основные объекты настоящего исследования представляют собой коллекторы разных типов: гранулярные (пористые), чисто трещинного типа и смешанные, т.н. трещиновато-пористые. Например, выработанное пространство, в соответствии с выделяемыми в разрезе по падению зонами, обладает свойствами, характерными для всех вышеперечисленных типов. Степень изученности процессов фильтрации жидкости в коллекторах разных типов различна. Наиболее полно они исследованы для условий поровых коллекторов и в меньшей мере для трещиноватых.

Простейшей моделью течения в трещине является прямолинейное стационарное течение вязкой жидкости в канале с параллельными стенками (щели). Впервые задача о ламинарном течении вязкой несжимаемой жидкости в щели была рассмотрена Ж. Буссинеском в 1868 г. [1]. Течение данного вида относится к так называемым слоистым течениям [2], характерным признаком которых является существование лишь одной составляющей скорости.

Экспериментальные исследования течения воды в щелях кольцеобразной формы и в трубах прямоугольного сечения проведены Л. Шиллером. Для плоских щелей при ламинарном и турбулентном режимах течения такие исследования наиболее полно проведены Г. Ломизе и С. Лоуисом. Основной задачей исследований Г. Ломизе являлось установление закономерностей течения воды в переходной области между ламинарным и турбулентным режимами, определение, в связи с этим, критического числа Рейнольдса, а также исследования закономерностей течения в щелях с шероховатыми стенками. Е. Ромм провел аналогичные исследова-ния с различными жидкостями для сверхтонких гладких щелей с раскры-тием до 0,2 μк.

Проведенные исследования позволили авторам сделать вывод о том, что в диапазоне $10^{-7} < Re < 10^{4}$ движение жидкости в щелях с параллельными стенками строго следует уравнениям классической гидродинамики, а критическое число Рейнольдса, при котором происходит переход от ламинарного к турбулентному течению определяется достаточно точно и равно 2000. Сделан также важный вывод о том, что влиянием шероховатости стенок на процесс фильтрации в большинстве случаев можно пренебречь.

Другим видом течения жидкости является плоско-радиальное сходящееся или расходящееся течение. Проблемы, связанные с таким типом течения давно привлекали к себе внимание. В практике они находят себе применение в связи с разработкой радиальных диффузоров, тарельчатых клапанов, упорных подшипников, элементов пневмо-гидроавтома-тики, аппаратов вертикального взлета, а также при исследовании течения в окрестностях нагнетательных и добычных скважин при разработке месторождений нефти и газа, предс-тавленных трещинными коллекторами.

Экспериментальные исследования сходящегося и расходящегося потока с целью подтверждения правильности математического описания течения, определения влияния входных условий на развитие течения, исследования конфигураций линий тока и т.д., выполнены лишь несколькими авторами и в довольно ограниченном диапазоне определяющих параметров. Проведенный обзор состояния исследований радиального потока в плоской щели указывает на то, что, несмотря на их значительный объем, сделать обоснованного вывода о возможности применения в практических расчетах той или иной рекомендуемой зависимости нет оснований. Требуются дополнительные экспериментальные исследования этой проблемы в расширенном диапазоне локальных чисел Рейнольдса для получения новых данных о распределении давления и других характеристик течения и сопоставления их с разработанными теоретическими зависимостями. Нуждается в экспериментальной проверке предположение [3] о возможности использования при сходящемся потоке результатов, полученных для ламинарного режима течения при локальных числах Рейнольдса значительно больших его критического значения $Re_{кр} = 2000$ для прямолинейного течения в плоском канале.

Модель трещины в виде двух параллельных пластин с одинаковым и постоянным расстоянием между ними является идеальной схематизацией реальной ситуации. В условиях неравномерной нагрузки силами горного давления трещины удерживаются в раскрытом состоянии за счет контактов, образованных выступами на поверхностях стенок, а динамика течения в них при высоких скоростях фильтрации определяется взаимодействием отдельных струй. Систематические исследования струйного течения в плоском канале в литературе отсутствуют. Учитывая, также, что течение в узком зазоре между близкорасположенными параллельными стенками является аналогом течения в пористых средах [4], накопление экспериментальных количественных характеристик такого типа течения, может послужить основой для теоре-тического обоснования законов филь-трации жидкости при высоких скоростях. Математическая модель высокоскоростной фильтрации предложена академиком РАН В.Е. Накоряковым [5].

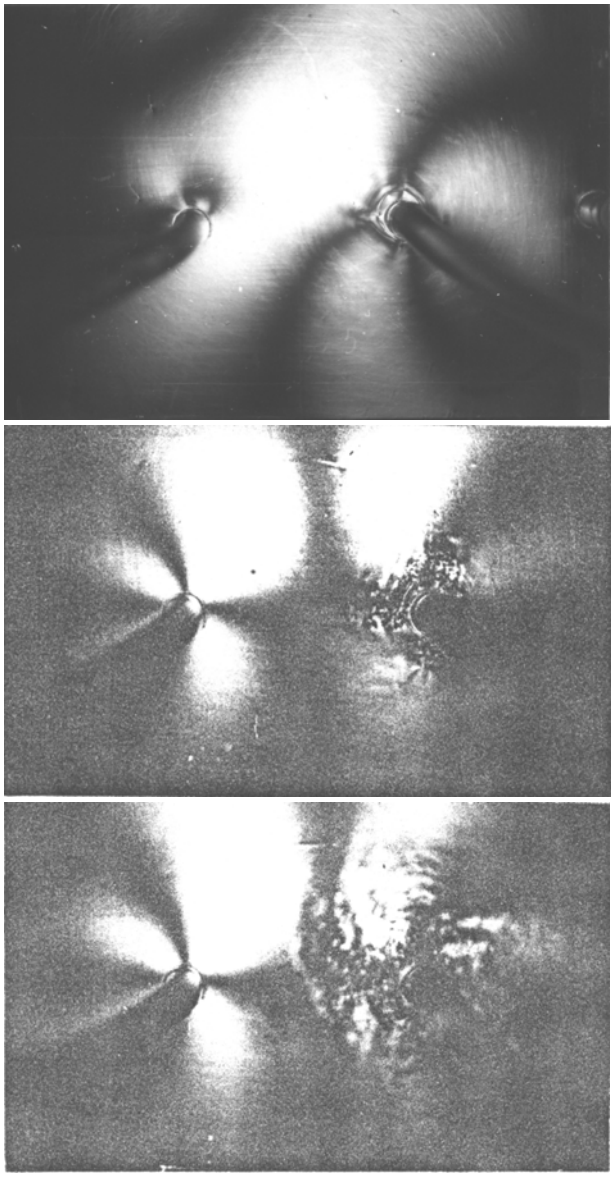
В настоящем исследовании описываются результаты, полученные с использованием поляризационно-оптического метода визуализации течения.

Методы визуализации получили право называться научными методами гидромеханики после классических опытов О. Рейнольдса, выполненных ещё в прошлом веке и позволивших установить два вида течения жидкости – ламинарное и турбулентное. Этот фундаментальный результат, во многом определивший дальнейшее развитие гидромеханики, вместе с тем открыл огромные возможности методов визуализации. Возрастающая роль методов визуализации в экспериментальной гидродинами-

ке выражается в увеличении числа публикаций по этому вопросу, появлении обзорных работ и монографий. Огромное разнообразие уже существующих и появление новых методов визуализации указывает на отсутствие универсального метода, пригодного для решения широкого круга прикладных задач гидромеханики и, поэтому, в каждом конкретном случае возникает необходимость выбора наиболее эффективного метода. Основной задачей данного этапа исследований было получение, в основном качественной информации об исследуемом течении. С этой целью были апробированы несколько методов визуализации, а именно метод водородных пузырьков, метод подкрашенной жидкости и метод трассеров в виде частиц алюминиевой пудры. Однако эксперименты показали, что такие преимущества этих методов как разработанность методик, сравнительная простота, воз-можность получения количественных результатов и др. нивелировались недостатками, проявившимися, прежде всего, в связи с геометрией исследуемого течения, а именно, – малым расстоянием между образующими канал параллельными поверхностями. В этих условиях интенсивное налипание трассеров на внутренних поверхностях канала приводило к невозможности исследования течения вскоре после их запуска. Анализ других методов визуализации показал, что наиболее эффективным в данной геометрии является поляризационно-оптический метод, основанный на использовании некоторых оптически активных прозрачных жидкостей, содержащих жесткие палочкообразные частицы, которые являются оптически изотропными в состоянии покоя и проявляют в движении свойство двойного лучепреломления, визуализируемого с помощью поляризованного света [6]. Этот метод наиболее полно представлен в работе [7] и позволяет визуализировать поток в целом, выявлять точки отрыва, вихревые области, обладает сравнительной простотой экспериментальной реализации. В качестве оптически - активной жидкости (ОАЖ) рекомендуется использовать ОАЖ на основе коллоидной системы пяти окиси ванадия, обладающей по сравнению с другими ОАЖ рядом преимуществ: высокой оптической активностью, прозрачностью, простотой технологии приготовления и недифицитностью исходных компонентов, подобием физико-механических свойств раствора ОАЖ и воды. Из недостатков необходимо отметить необходимость использования для изготовления моделей специальных химически неактивных конструкционных материалов (стекло, оргстекло и др.), обусловленную очень высокой неустойчивостью коллоидного раствора пяти окиси ванадия в отношении электролитов, щелочей, кислот и т.д.

Поскольку получаемая промышленным способом сухая пяти окись ванадия в виде порошка мало растворяется в воде и не дает оптически активного раствора, нами использовался в качестве ОАЖ коллоидный раствор пентаоксида ванадия 0,05 %-ной концентрации.

Визуализация течения по схеме источник–сток проводилась на стенде, в котором жидкость из напорного бака через ротаметр РС-3 и регулировочный вентиль поступала в гидравлический канал и через мерный бак изливалась в нижнюю емкость. Расход жидкости фиксировался либо по показаниям ротаметра, протарированного весовым методом, либо с помощью мерного бака и секундомера. Гидравлический канал собирался из двух пластин оргстекла размером 0,40×0,30×0,25, прижимаемых друг к другу по периметру струбцинами через



а)

б)

в)

Рис. 1. Визуализация течения методом ОАЖ при течении по схеме источник-сток: а – $Re=2\cdot10^3$; б – $Re=1{,}4\cdot10^4$; в – $Re=3{,}5\cdot10^4$

прокладку из оргстекла толщиной $h = 1{,}0\cdot10^{-3}$ м.

В одной из пластин были высверлены отверстия радиусом $r_c = 1$ мм на расстоянии друг от друга 0,06 м и приклеены входной и выходной штуцер для обеспечения ввода и отвода жидкости, моделирующие нагнетательную (источник) и добычную (сток) скважины. Для удобства дешифровки использовалась координатная сетка с размером ячейки 5×5 мм, нанесенная на внешнюю поверхность другой пластины.

Схема оптической части стенда обеспечивала нормальную фоторегистрацию с помощью фотоаппарата «Зенит-Е» с объективам «Индустар 2,8/50». В качестве источника света использовался либо диапроектор «Свитязь», либо импульсная фотовспышка «Луч-61». Число Рейнольдса определялось по удвоенной толщине зазора между пластинами h и средней скорости на входе из скважины в трещину ($Re=W/\pi r_c\nu$).

Визуализация течения с получением фотографий методом нормальной фоторегистрации с экспозицией 1/30 с была выполнена для 10 фиксированных расходов жидкости в диапазоне чисел Re от 10^3 до 10^5. На рис. 1 представлены некоторые из этих фотографий. Отчетливо наблюдается эволюция турбулентной зоны в окрестности источника с ростом числа Re. При $Re = 2\cdot10^3$ – поток ламинарный во всей области течения. При $Re = 1{,}2\cdot10^4$ в окрестности источника наблюдается турбулентная область с радиусом $r_T = 10^{-2}$ м. В окрестности стока течение по-прежнему визуализируется как ла-

минарное. При Re = 3,5 10^4 радиус турбулентной зоны около источника возрастает и равен r_T = (2,5÷3,0) 10^{-2} м. В окрестности стока визуализация течения не показывает каких-либо изменений. Ориентировочное значение числа Рейнольдса, соответствующее ламинаризации потока ($Re_{кр} = \frac{\varpi}{\pi r_T \nu}$), подсчитанное из размеров турбулентных зон, образующихся в окрестности источника при различных расходах жидкости, оказалось равно $Re_{кр}$ =1500 ÷ 2000, что находится в хорошем соответствии с критическим числом Re для плоской щели при прямолинейном плоскопараллельном течении. Технические возможности установки были ограничены верхним пределом числа Re = $5 \cdot 10^4$ и вплоть до этого значения течение в окрестности стока визуализировалось как ламинарное. Эти наблюдения качественно подтверждают выводы тех исследователей, которые указывают на стабилизирующее влияние ускорения и возможность применения уравнений для ламинарного течения, хотя локальное число Re может намного превышать критическое значение для прямолинейного плоскопараллельного потока.

Визуализация струйного течения выполнена с применением поляризационно-оптического метода на установке, гидравлический канал в которой собирался из двух пластин оргстекла размером 0,28×0,58×0,035 м, прижимаемых друг к другу по периметру струбцинами через прокладку из оргстекла толщиной h = $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м, вырезанную по конфигурации, обеспечивающей истечение струи жидкости из сопла длиной l = $8{,}5 \cdot 10^{-3}$ м и шириной b = $3 \cdot 10^{-3}$ м в затопленное пространство, имеющее размеры в плане 0,24×0,42 м. В одной из пластин выфрезированы отверстия и приклеены входной и выходной коллекторы со штуцерами для обеспечения ввода жидкости в сопло и равномерный отвод её из затопленного пространства.

Некоторые фотографии визуализированного течения, полученные методом нормальной фоторегистрации с экспозицией 1/30 с представлены на рис. 2 и отражают эволюционные стадии струи при возрастании числа Рейнольдса, построенного по удвоенной толщине зазора h и средней скорости на выходе из сопла (Re = $\frac{2 \cdot W}{h \cdot \nu}$).

До чисел Re ≅ 2000 (рис. 2, *а*) режим течения ламинарный с отчетливо выделенными границами струи и примерно одинаковым углом диффузорности β ≅ 2°. При этом «дальнобойность» струи прямо пропорциональна числу Re. Дальнейшее увеличение числа Re приводит к появлению в конце основного участка струи поперечной неустойчивости. Ламинарный участок течения постепенно уменьшается в продольном направлении (рис. 2, *б*). При Re = 2800 до x/h = 30 струя сохраняет свои четкие границы при неизменной практически линейной зависимости её ширины от продольной координаты, а далее вниз по течению становится неустойчивой. При Re = 3200 до x/h = 20 сохраняется та же структура струи, а далее происходит её распад с переходом к

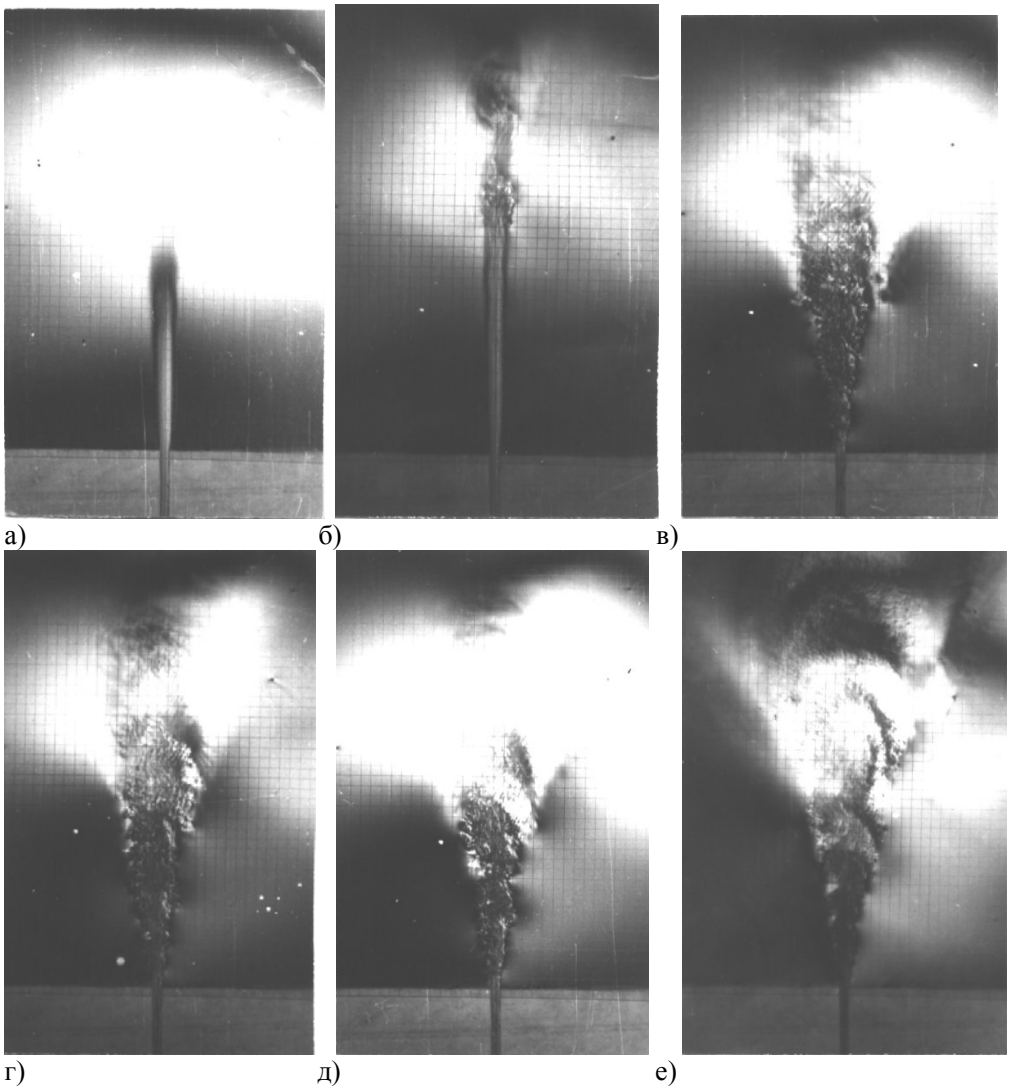


Рис. 2. Визуализированные картины эволюции струи: а) Re=1400; б) Re=2800; в) Re=3600; г) Re=5400; д) Re=13400; е) Re=20800

турбулентному режиму. Режим при Re > 3500 (рис. 2, *в-е*) характеризуется полностью развитым турбулентный течением, начинающимся практически у среза сопла. Угол диффузорности увеличивается ($\beta \cong 11^{o}$), «дальнобойность» струи уменьшается. Структура течения становится достаточно сложной и зависящей от расстояния вниз по потоку. Увеличение числа Re приводит также к всё большей потере струей поперечной устойчивости, её внешняя граница имеет резкие изменения угла диффузорности, а геометрия линий тока создаёт их очень извилистую структуру. Интересной особенностью течения в переходной области является возможность перехода к турбу-

лентному режиму в середине основного участка струи (рис. 2, *б*).

Таким образом, струйное течение в узком зазоре меду параллельными пластинами имеет ряд особенностей по сравнению с течением в плоском канале и свободным струйным течением. Локальное число Рейнольдса, построенное по толщине зазора и средней скорости жидкости в данном сечении, падает вдоль струи в связи с уменьшением скорости жидкости. Это приводит к распаду турбулентного течения на некотором расстоянии от начала струи. Возникновение турбулентного режима происходит в некоторой точке, в которой локальное число Рейнольдса меньше начального. Параметром, определяющим возникновение турбулентного течения, является число Рейнольдса, построенное по расстоянию между пластинами, а не по ширине струи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boussinesq J.* // Journ. de Lionville. – 1868. – 13. - 227.
2. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг – М.: Наука, 1974. – 711 с.
3. *Murphy H.D.* Symmetric sink flow between parallel plates / H.D. Murphy, M. Coxon, D.H. McEligot // ASME Journal of Fluids Engineering. – 1978. - vol. 100. - P.477-484.
4. *Бэр Я.* Физико-математические основы фильтрации воды / Я. Бэр, Д. Заславски, С. Ирмей – М.: Мир, 1971. – 451 с.
5. *Накоряков В.Е.* Ламинарная струя в «узкой» щели при больших числах Рейнольдса / В.Е. Накоряков, Н.Н. Яичникова // ЖПМТФ. – 1985. – №5. – С. 20-29.
6. *Брэдшоу П.* Введение в турбулентность и ее измерение / П. Брэдшоу. – М.: Мир, 1974. – 278 с.
7. *Бычков Ю.М.* Визуализация тонких потоков несжимаемой жидкости / Ю.М. Бычков. – Кишинев: Штиинца, 1981. – 109 с. ГИАБ

Коротко об авторе

Павлов И.А. – доцент, кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный горный институт.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 19 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Ж. Аренс.*