

ПРОМЫСЛОВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И РАЗВИТИЕ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОМЕХАНИКИ В КАЗАНСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

В связи с вводом в эксплуатацию Ромашкинского нефтяного месторождения руководство Татарии обратилось к учёным республики оказать помощь нефтяникам в его освоении. На бывшем физико-математическом факультете университета были организованы группы по различным направлениям, связанным с совершенствованием научных основ рациональной разработки нефтяных месторождений.

Одна из таких групп была создана заведующим кафедрой радиоэлектроники проф. Н.Н. Непримеровым; она объединяла сотрудников кафедр: радиоэлектроники, аэрогидромеханики, прикладной математики, а также отдела подземной гидромеханики НИИ математики и механики при университете. Отличительной особенностью этой группы было то, что научные исследования по подземной гидромеханике основывались на богатейшем экспериментальном материале, полученном самой группой в промысловых условиях. Для этого были разработаны и воплощены в металл оригинальные и высокоточные приборы, позволяющие измерять в работающей скважине основные характеристики: дебит скважины, забойное давление и температуру. В лучшие годы в группу входило до десятка докторов и полутора десятка кандидатов наук.

Богатейший экспериментальный материал был использован в совершенствовании отдельных разделов подземной гидромеханики и в приложении их к рациональной разработке нефтяных месторождений. Ниже будут отмечены основные научные достижения, полученные этой группой.

Остановимся вначале на проблеме охлаждения нефтяных пластов, состоящих из пропластков различной проницаемости, оставив в стороне весь драматизм борьбы вокруг этой проблемы. Согласно Генеральной схеме разработки Ромашкинского месторождения было "разрезано" на отдельные, автономно эксплуатируемые, площади путем внутриконтурной закачки громадных объемов холодной воды; эксплуатация отдельных площадей также проводилась с помощью нефти водой. Всё это создавало условия для быстрого прохождения воды по пропластку с хорошей проницаемостью и существенного отставания в плохо проницаемых пластах. Очевидно, при таком способе эксплуатации появлялась реальная угроза охлаждения нефти, находящейся в слабопроницаемых пропластках, до температуры выпадения из неё парафина, а следовательно, вывода этой нефти из эксплуатации. В связи с этим проблема охлаждения нефти была подвергнута тщательному и всестороннему изучению как экспериментально, так и теоретически.

В результате этих исследований дальнейшее суще-

ственное развитие получил так называемый метод "сосредоточенной ёмкости", широко используемый при решении температурных задач движущейся жидкости. На основе этого "модернизированного" метода проф. Н.Н. Непримеровым и М.А. Пудовкиным были рассчитаны и проанализированы различные элементы термоводнения.

В настоящее время температурному режиму эксплуатируемого месторождения уделяется должное внимание.

Далее, как известно, фильтрационные параметры окрестности скважины и всего месторождения в целом лежат в основе любой технологии его разработки. Поэтому совершенствованию способов определения этих параметров, в частности, нестационарными гидродинамическими методами учёными – нефтяниками уделялось большое внимание, в том числе и группой Н.Н. Непримерова. Анализ большого экспериментального материала, связанного с поведением кривых восстановления давления, падения дебита, а также с особенностями распространения периодических возмущений, позволил сделать ряд существенных выводов.

Прежде всего, это касается скорости распространения возмущений в пласте V_0 ; она считалась очень большой ($V_0 = \infty$). Однако из промысловых экспериментов, связанных с распространением периодических возмущений, следует, что она конечна, и её значение для девона Ромашкино равно 5 – 7 метров в секунду.

Почти одновременно и независимо от проф. Н.Н. Непримерова аналогичные результаты были получены акад. С.А. Христиановичем. При исследовании особенностей фильтрации газа (пропана) в угольных пластах в лабораторных условиях им было получено, что V_0 имеет порядок 7 – 10 метров в секунду, и она обусловлена трещиноватым строением угольного пласта. Таким образом, закон Дарси

$$\vec{w} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } p \quad (1)$$

(здесь и в дальнейшем обозначения стандартные), хорошо описывающий достаточно медленную (в гидростатическом приближении) нестационарную фильтрацию в равномерной по структуре строения пористой среде, нуждался в уточнении. В простейшем случае это уточнение связано с введением в него дополнительного слагаемого; закону фильтрации придают форму (Христианович и др.):

$$\tau \frac{\partial \vec{w}}{\partial t} + \vec{w} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } p. \quad (2)$$

Тогда, считая жидкость капельной, а пористую среду слабо сжимаемой, т.е. представляя количество жидкости в элементарном объёме в виде

$$m\rho = m_0\rho_0 + \rho_0\beta(p - p_0), \quad (3)$$

после подстановки соотношений (2) и (3) в уравнение неразрывности фильтрационного потока

$$\rho_0 \operatorname{div} \vec{w} + \frac{\partial(m\rho)}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

получим, что давление удовлетворяет телеграфному уравнению

$$\nabla^2 p = \frac{1}{\chi} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{V_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}; \quad (5)$$

здесь $V_0 = \sqrt{\chi/\tau}$.

Очевидно, при $\tau = 0$ получим уравнение пьезопроводности

$$\chi \nabla^2 p = \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (6)$$

решения которого подробно изучены проф. В.Н. Щелкачёвым.

Итак, в определённых ситуациях, например, при достижении скоростью фильтрации на забое скважины скорости V_0 окрестность скважины перестаёт реагировать на дальнейшее понижение забойного давления; тем самым ожидаемого увеличения дебита не произойдёт.

В связи с тем, что нефти, особенно тяжёлые, имеют весьма сложное строение, их невозможно отнести к разряду ньютоновских жидкостей. Бакинские учёные во главе с акад. А.Х. Мирзаджанзаде предложили считать их телами типа Бингамма–Шведова, т.е. обладающими предельным напряжением сдвига (начальным градиентом давления g_0). В этом случае закон фильтрации таких жидкостей становится нелинейным

$$\vec{w} = -\frac{k}{\mu} f(|\operatorname{grad} p|, g_0) \operatorname{grad} p. \quad (7)$$

Основной особенностью стационарной фильтрации таких нефтей является то, что в районах пересечения нейтральных линий тока, разграничивающих области влияния отдельных скважин, образуются так называемые застойные зоны, т.е. зоны, где нефть практически остаётся неподвижной. Поэтому установление наличия такого предельного градиента и его значение в промысловых условиях весьма важно; от него зависят размеры застойных зон. Проф. Н.Н. Непримеровым был определён этот начальный градиент давления для достаточно легких нефтей Ромашкино; его значение порядка 5 атмосфер на километр. Гидродинамическими расчётами для типовых расстановок скважин занимался ряд учёных, в их числе проф. Ю.М. Молокович, Э.В.Скворцов.

Как отмечалось выше, в основе определения фильтрационных параметров окрестности лежит, в основном, кривая восстановления забойного давления (КВД). От того, какая модель фильтрации будет использована при её обработке, непосредственно зависят значения полу-

чаемых параметров. В то время кривые КВД обсчитывались с помощью модели Щелкачёва: (1), (4), (3). Эта модель удовлетворительно описывает нестационарную фильтрацию при достаточно небольших (по амплитуде) возмущениях, вносимых в работу скважины, а также в пластах, имеющих близкую к равномерной структуре строения, которую можно смоделировать пучком эластичных капилляров одного диаметра. Однако в реальных условиях эти два положения не соблюдаются, о чём свидетельствует экспериментальный промысловый материал, в частности, КВД.

На многочисленных КВД, построенных в специальных координатах, чётко прослеживается отклонение в начальные моменты времени от прямолинейной зависимости, соответствующей модели Щелкачёва. Объяснение этому факту сводится к следующему. КВД снимается в условиях перехода от одного стационарного состояния к другому, причём работа скважины в некоторый момент времени резко меняется и сопровождается большими скачками дебита скважины. Система жидкость – пористая среда не может мгновенно приспособиться к новым условиям, а требуется определённое время (время запаздывания) для выхода этой системы в новое равновесное состояние. Таким образом, в начальные моменты времени нестационарная фильтрация будет проходить в неравновесных условиях. Проблема ещё усугубляется тем, что, как правило, строение пористой среды имеет неравномерную структуру, т.е. её нельзя смоделировать пучком эластичных капилляров одного диаметра.

Основным итогом работы теоретической части группы (Молокович и др.) явилось создание теории неравновесной фильтрации, которая целиком основана на промысловых данных, полученных экспериментальной частью группы.

Итак, фильтрация жидкости, в частности в окрестности скважины, в начальные моменты времени проходит в неравновесных условиях. Простейшая модель такой фильтрации может быть описана следующей системой уравнений (Непримеров, Молокович):

$$\vec{w} = -\frac{k \tau_p}{\mu \tau_w} \operatorname{grad} p - \frac{k}{\mu} \left(1 - \frac{\tau_p}{\tau_w}\right) \int_0^t \operatorname{grad} p \cdot \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_w}\right) \frac{dt'}{\tau_w}, \quad (8)$$

$$\rho_0 \operatorname{div} \vec{w} + \frac{\partial(m\rho)}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

$$m\rho - m_0\rho_0 = \rho_0\beta \frac{\theta_p}{\theta_m} (p - p_0) - \rho_0\beta \left(1 - \frac{\theta_p}{\theta_m}\right) \int_0^t (p - p_0) \exp\left(-\frac{t-t'}{\theta_m}\right) \frac{dt'}{\theta_m}; \quad (9)$$

где τ_p , τ_w , θ_p , θ_m – постоянные размерности времени, первая пара из них ответственна за неравновесное поведение

Пермские водоросли Актюбинского Приуралья

Г.В. Сонин

*Светлой памяти выдающегося
палеоботаника, теоретика био-
стратиграфии и эволюционного учения
Сергея Викторовича Мейена
посвящается*

$$\vec{w}_1 = -\frac{k_1}{\mu} \text{grad } p_1, \quad \vec{w}_2 = 0; \quad (10)$$

$$\rho_0 \text{div } \vec{w}_1 + \frac{\partial(m_1 \rho)}{\partial t} - q = 0, \quad ; \quad \frac{\partial(m_2 \rho)}{\partial t} + q = 0 \quad (11)$$

$$m_{1,2} \rho - m_{01,2} \rho_0 = \rho_0 \beta_{1,2} (p_{1,2} - p_0); \quad (12)$$

$$q = \rho_0 A (p_2 - p_1). \quad (13)$$

Здесь индекс "1" относится к характеристикам трещин, а индекс "2" – к характеристикам пористых блоков; обмен жидкостью между блоками и трещинами характеризуется величиной q .

Модель Баренблатта подразумевает, что течение жидкости осуществляется только по трещинам; поэтому только трещины гидродинамически связаны с границами области фильтрации, в частности, со скважиной. Согласно модели Баренблатта, КВД, перестроенная в специальных координатах, должна иметь два прямолинейных участка с одинаковыми наклонами, первый из которых соответствует тому периоду времени, когда перетоком жидкости из блоков в трещины можно пренебречь, и второй – когда переток жидкости из блоков в трещины практически завершился.

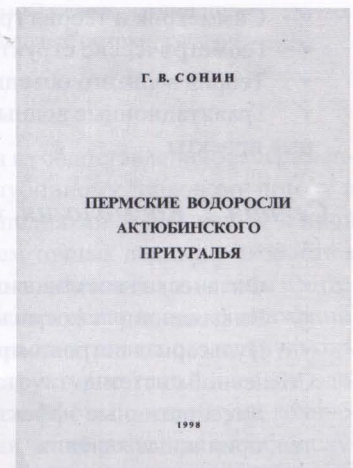
Тщательные промысловые эксперименты, в частности, связанные со снятием КВД, проведённые на ряде месторождений, имеющих трещиновато – пористый коллектор, показали, что начальный участок КВД имеет, как правило, наклон, отличный от участка, когда переток жидкости из блоков в трещины уже завершён. Такое поведение КВД отражает тот факт, что в начальные моменты времени фильтрация в трещинах осуществляется в неравновесных условиях, которые модель Баренблатта не учитывает. Учёт неравновесности фильтрации в начальные моменты времени при движении жидкости в трещиновато-пористом коллекторе приводит, в простейшем случае, к следующей системе уравнений (Молокович и др.): (8), (11), (12), (13); в соотношении (8) величины w, k, p надлежит снабдить индексом "1".

Итак, подводя итог сказанному выше, можно отметить, что промысловый эксперимент явился мощным толчком в развитии различных разделов подземной гидромеханики в Казанском университете.

КГУ. 1998. 57 с. XIV табл.
лиц. ISBN 5-7464-1262-7.

Впервые в мировой литературе дается описание водорослевой флоры и растительности из строматолитов кунгура и красноцветных отложений верхней перми. Приводится распределение видов и сообществ водорослей по разрезу Южно-Уральского периклиналильного прогиба и обосновывается расчленение его на свиты, сопоставляемые с горизонтами и ярусами стратотипической области Русской платформы. Работа предназначена для геологов-палеонтологов, стратиграфов и других специалистов, интересующихся развитием органического мира, строматолитообразующими водорослями и фациальной обстановкой заключительного периода палеозоя.

Первоначально работа была выполнена при поддержке С.В. Мейена и защищена как кандидатская диссертация. Спустя тридцать лет опубликована в качестве материалов к Международному симпозиуму «Пермские стратотипы Поволжья» (Казань, 1998).



Юрий Матвеевич Молокович

*доктор физико-
математических наук,
почётный член РАЕН,
профессор кафедры
аэрогидромеханики
Казанского
государственного
университета. Область
научных интересов : теория
неравновесной фильтрации
в пористых средах
сложного строения и
приложения её к разработке
нефтяных месторождений.*

