

ГИДРОДИНАМИКА ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕД

Р. С. ГУРБАНОВ, А. Ф. КАСИМОВ, А. Х. МИРЗАДЖАНЗАДЕ

(Баку)

Рассматриваются некоторые результаты, полученные в гидродинамике вязко-пластичных сред на основе модели Шведова — Бингама при решении задач нефте-промысловой механики (бурения, добычи и разработки нефтяных месторождений).

Вязко-пластичные среды находят применение в нефтяном деле в виде глинистых и цементных растворов, нефте-песочных и фенолформальдегидно-песочных смесей и т. д.; кроме того, ряд нефтей сам по себе относится или может быть отнесен к вязко-пластичным средам. При этом возникает ряд разнообразных задач, связанных с различными процессами движения вязко-пластичных сред:

- 1) нестационарное движение вязко-пластичных сред;
- 2) движение цилиндрических тел в вязко-пластичной среде;
- 3) последовательное движение вязко-пластичных сред;
- 4) гидростатика тиксотропных вязко-пластичных сред;
- 5) фильтрация вязко-пластичных сред в пористой среде;
- 6) процесс теплообмена в вязко-пластичной среде.

Дифференциальные уравнения движения несжимаемых вязко-пластичных сред записаны Г. Генки. Различные формы уравнений движения получены в [28]. Дифференциальные уравнения движения сжимаемых вязко-пластичных сред получены в работе [4], где для замыкания системы уравнений вязко-пластичной сжимаемой среды предлагают применить уравнение состояния Г. М. Ляхова.

С применением условий пластичности Мизеса в работе [21] выведены уравнения пространственного движения вязко-пластичных сред.

В работе [38] с использованием кусочно-линейных потенциалов линеаризованы уравнения движения вязко-пластичных сред.

В работе [19] рассмотрено уравнение пространственного движения при кусочно-линейных потенциалах, соответствующих максимальному напряжению.

Наибольшее применение получили дифференциальные уравнения движения вязко-пластичных сред, предложенные Генки. В дальнейшем требуется опытная проверка возможности применимости этих уравнений для пространственного случая.

Задачи устойчивости вязко-пластичных движений исследовались в [20, 21, 22].

В [20] для решения простых задач вязко-пластичной среды предложен метод «близких движений», в котором известная функция тока определенной задачи с определенными граничными условиями используется для определения функций тока задачи с граничными условиями, каждая из которых лишь незначительно отличается от предыдущей задачи. Отметим, что при этом линеаризуются дифференциальные уравнения и граничные условия близкого движения по отношению к предшествующему движению.

В этих работах показано, что неустойчивость вязко-пластичного растяжения исчезает по мере приближения характера течения к вязкому при малом предельном напряжении сдвига или при больших скоростях деформации.

Критерии подобия при движении вязко-пластичных сред предложены в работах [20, 28, 45, 50]. При этом, как и следовало ожидать, наряду с известными критериями подобия, следует применять критерий Сен-Венана, представляющий сопоставление сил предельного напряжения сдвига и вязкости. Показано, что для целого ряда случаев стационарного движения в трубах можно воспользоваться обобщенным параметром Рейнольдса (см., например, [30]).

Отметим, что в основном решены одномерные стационарные и нестационарные задачи для вязко-пластичных сред, приводящие к линейным уравнениям. Некоторые точные решения задач одномерного стационарного движения вязко-пластичной среды, приводящие к квазилинейным уравнениям эллиптического типа, получены в [38], где линеаризовано уравнение движения при помощи преобразования Лежандра. В последнее время появились решения ряда задач при сложном сдвиге. К этим работам относятся исследования [35]. Исследованию стационарных течений вязко-пластичной среды в трубах некругового сечения посвящены работы [7, 9]. В последней работе построены решения, которые для замкнутых контуров зависят от величины перепада давления за исключением области, клинообразной в плане.

В [12] для приближенного решения предлагается предельное напряжение сдвига учитывать не в уравнениях, а в граничных условиях.

Вариационные принципы для исследований движений вязко-пластичных сред впервые были применены в [20] и обобщены на более общий нелинейный закон Л. С. Лейбензоном [26]. В дальнейшем в работе [32] эти принципы были применены для качественного исследования стационарных движений вязко-пластичных сред, в частности, рассмотрены движения в трубах различного поперечного сечения, доказана теорема существования и единственности решения.

В [33] детально рассмотрен вопрос о существовании застойных зон при течениях в трубах и выделен достаточно большой класс поперечных сечений, для которых ядро будет единственным. Авторами показано, что уравнение Эйлера применимо в областях, для которых градиент скорости отличен от нуля. Для случая, когда решение имеет постоянное значение, уравнение Эйлера заменяется некоторыми геометрическими условиями. В частности, для ядра — это динамическое условие движения твердого тела. До работы [33] такие условия вводились в задачу как дополнительные предположения. В [23] применен метод малого параметра для решения некоторых задач стационарного движения вязко-пластичных сред. В работе [34] построен аналог известного решения Прандтля о сдавливании слоя из идеально пластического материала, для решения задачи о сдавливании вязко-пластичной среды жесткими плитами. Полученное решение представляет интерес для анализа осложнений в процессе проводки скважин, связанных с вытеканием глин.

Нестационарное движение вязко-пластичных сред рассмотрено в работах [6, 43, 47]. Эти задачи связаны с ударом стержня о вязко-пластичные тела и круговым движением вязко-пластичных сред.

Рассмотрим задачу о нестационарном безынерционном движении вязко-пластичных сред, например в круглой цилиндрической трубе. Дифференциальное уравнение, начальные и граничные условия имеют вид (ось направлена вдоль трубы)

$$\rho \frac{\partial v_1}{\partial t} = \eta \left(\frac{\partial^2 v_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_1}{\partial r} \right) - \frac{\tau_0}{r} - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (r_0 \leq r \leq R) \quad (1)$$

$$v_1(r, 0) = f(r), \quad v_1(R, t) = 0$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial r}(r_0, t) = 0, \quad \rho = \frac{\partial v_1}{\partial t}(r_0, t) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2\tau_0}{r} \quad (2)$$

Здесь v_1 — проекция скорости движения на ось z ; ρ — плотность среды; η — структурная вязкость; τ_0 — предельное напряжение сдвига; p — давление; r — радиус вязко-пластичной области движения; r_0 — радиус упругой области движения; R — радиус трубы; t — время.

Таким образом, задача нестационарного движения вязко-пластичной среды приводится к краевой задаче для уравнения параболического типа с подвижной границей [28]. Некоторые точные решения получены в [41, 42]. Отметим, что в рассматриваемых случаях целесообразно воспользоваться степенной зависимостью между напряжениями и скоростью деформации. При этом уравнение приобретает нелинейный характер, но подвижная граница уже не имеет места.

В каждом конкретном случае должна быть выбрана та или другая модель в зависимости от возникающих математических трудностей. Практическое применение схемы Шведова—Бингама для решения задач нефтепромысловой механики более широкое, чем для степенной зависимости. Получен ряд автомоделных решений о нестационарном движении вязко-пластичных сред. Автомоделное решение задачи о вращении круглого цилиндра в вязко-пластичной среде приведено в [28].

Дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$\rho \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} = \eta \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right) - \frac{2\tau_0}{r} \quad (3)$$

Здесь v_φ — скорость. Граничными и начальными условиями будут

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left[2\pi r^2 l \eta \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right) - \pi r^2 \rho l \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} - 2\pi r^2 l \tau_0 \right] = at \quad (4)$$

$$v_\varphi(R, t) = 0, \quad \frac{\partial v_\varphi}{\partial r}(R, t) = 0, \quad R(0) = 0 \quad (5)$$

Здесь l — длина цилиндра; R — радиус вращающейся части среды.

Решение уравнения (3) при принятых условиях автомоделно имеет вид

$$v_\varphi = \frac{\tau_0 \sqrt{t}}{\sqrt{\eta \rho}} f \left(\xi, \frac{l \eta \tau_0}{\rho a} \right), \quad \xi = \frac{r}{\sqrt{\eta t / \rho}}$$

$$f = c_1 \xi \left\{ -\frac{e^{-1/4 \xi^2}}{\xi^2} - \frac{1}{4} \left[2 \ln \xi + \sum_{n=1}^{\infty} \left(-\frac{1}{4} \right)^n \frac{\xi^{2n}}{n \cdot n!} \right] \right\} + c_2 \xi - \frac{2}{\xi}$$

Из условия (4) определяется c_1 , а для удовлетворения условиям (5) необходимо выполнение соотношения

$$R = \beta \sqrt{\eta t} / \rho$$

Из условий (5.1) и (5.2) получаются два уравнения, из которых определяются β и c_2 . Рассмотрен случай продольного автомодельного движения цилиндра в вязко-пластичной среде.

Путем перехода к так называемой обратной задаче решение задачи о нестационарном движении вязко-пластичных сред значительно упрощается. При решении обратных задач задается закон изменения размера ядра во времени и определяется соответствующая этому закону скорость трубы или пластинок [13].

Рассмотрим прямолинейное нестационарное движение вязко-пластичной несжимаемой среды между двумя параллельными пластинками. Положим, что при $t < 0$ нижняя пластинка была неподвижной, а верхняя пластинка двигалась с постоянной скоростью. При $t > 0$ обе пластинки движутся с некоторыми скоростями, подлежащими определению. Принимается, что $\Delta p = 0$ при $t > 0$.

Дифференциальное уравнение в этом случае имеет вид

$$\rho \partial v_1 / \partial t = \eta \partial^2 v_1 / \partial x^2 \quad (6)$$

Начальные и граничные условия задаются в виде

$$v_1(x, 0) = -\frac{v}{h} x, \quad \frac{\partial v_1}{\partial x}(x_0, t) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial t}(x_0, t) = -\frac{\tau_0}{\rho x_0}, \quad x_0(0) = 0 \quad (8)$$

Здесь h — расстояние между пластинками. Зададим закон изменения ядра x_0 в виде

$$x_0 = \alpha \sqrt{t} \quad (\alpha = \text{const})$$

Из (8.2), учитывая, что $x_0 = 0$ при $t = 0$, а $v_1(0, 0) = 0$, получим скорость ядра, соответствующую скорости движения нижней пластинки

$$v_1(x_0, t) = -2\tau_0 \sqrt{t} / \rho \alpha \quad (9)$$

Решение сформулированной задачи автомодельно и имеет вид

$$v_1(x, t) = A \sqrt{t} f(\xi), \quad A = 2\tau_0 / \rho \alpha, \quad \xi = x / \sqrt{2\eta t} / \rho \quad (10)$$

Аналогичная задача решена для прямолинейного нестационарного движения вязко-пластичной среды в круглой цилиндрической трубе. Здесь принимается, что при $t < 0$ имеет место стационарное движение с распределением скоростей по закону $-\tau_0 r / \eta$. Полученные решения использованы для того, чтобы показать приемлемость для решения такого рода задач методов пограничного слоя.

В [17, 28] применен метод осреднения Слезкина — Тарга для решения нестационарного движения вязко-пластичных сред, а в [25, 28] применен метод Швеца.

Решение отмеченных задач представляет интерес для вискозиметрии, определения гидродинамического давления при спускоподъемных операциях, определения утечек жидкости в зазоре между плунжером и цилиндром глубинного насоса и т. д. Представляют интерес экспериментальные исследования применимости гипотезы квазистационарности к нестационарным движениям вязко-пластичных сред, приведенные в [46]. Вращательное движение вязко-пластичных сред рассмотрено в [28, 39].

Формулированию граничных условий при вращательном движении вязко-пластичных сред посвящена работа [1, 2]. Рассмотренные задачи связаны с теорией ротационных вискозиметров.

В последнее время было показано, что при движении некоторых вязко-пластичных сред (глинистый раствор, система, состоящая из технического глицерина, воды и кварцевого песка, суспензия бумажной массы и др.) на гидравлическое сопротивление сравнительно большое влияние оказывает пристенный слой, по вязкостным свойствам близкий к дисперсионным средам [46].

Экспериментальные исследования по движению глинистых растворов в трубах с проницаемыми стенками показали, что на гидравлическое сопротивление существенное влияние оказывает отфильтрование дисперсной среды — воды. Учет фильтрации воды приводит к существенному уменьшению гидравлических сопротивлений. Отмеченное может быть объяснено влиянием пристенного эффекта.

Экспериментальные исследования показали, что различные добавки существенно снижают гидравлические сопротивления при движении глинистых и цементных растворов. Так, например, при добавке к цементному раствору 0.3% сульфит спиртовой барды коэффициент гидравлических сопротивлений снижается на 20%.

Еще в 1946 г. была решена простейшая задача стационарного движения вязко-пластичных сред в плоской трубе и между круглыми соосными цилиндрами [41].

В пятидесятых годах обобщена задача (приведенная в [11] для случая, когда внутренний цилиндр движется с некоторой скоростью), представляющая интерес для определения гидродинамического давления и утечки жидкостей [16].

Исследованию гидродинамического давления на стенке скважины в процессе спуско-подъемных операций, с учетом нестационарности, посвящена работа [31]. В [31] систематически излагаются вопросы применения гидродинамики вязко-пластичных сред для объяснения осложнений проводки скважин.

Отметим, что выражения для определения гидродинамического давления получены без учета эксцентричного расположения бурильных труб, а также изменения структурно-механических свойств промывочной жидкости по длине ствола скважины, что может в ряде случаев привести к существенным погрешностям. При замере гидродинамического давления возникают затруднения при спуске специального глубинного манометра, расположенного на конце бурильного инструмента.

Сущность предложенного способа заключается в следующем. В процессе промывки скважины при различных расходах (не менее двух) самопишущим манометром определяется давление на насосе. Далее навинчивается ведущая труба, производятся спуск и подъем инструмента с промывкой при тех же величинах расхода, различных скоростях спуско-подъема и определяется давление на насосе. Разность этих измерений характеризует величину гидродинамического давления.

Проведение опытов при различных расходах определяется необходимостью установления такого значения гидродинамического давления, которое не зависит от расхода промывочной жидкости.

В подтверждение правильности этого способа проведено сравнение величины гидродинамического давления, определенной предложенным способом при спуске и подъеме бурильного инструмента, с величиной этого давления, замеренной одновременно глубинным манометром, расположенным на конце бурильного инструмента. Как показали эти экспериментальные работы, выполненные на бурящейся скважине, величины гидродинамического давления при спуско-подъемных операциях, замеренные обоими способами, почти совпадают. При этом следует отметить, что при одинаковых скоростях спуска и подъема инструмента полученные величины изменения гидродинамического давления равны между собой.

Исследованию роста абсолютного значения давления при разделении фаз газированной вязкой жидкости в замкнутой системе посвящен ряд работ. Из всех работ в этой области лишь в одной [4*] экспериментальным путем удалось измерить эффект роста давления вследствие сегрегации газа.

Для изучения данного вопроса проведены экспериментальные исследования с газированной вязко-пластичной средой в лабораторных условиях. При этом удалось непосредственно измерить рост давления вследствие сегрегации газа.

Рассмотрен вопрос о режимах движения глинистых и цементных растворов.

Известно, что введение в вязкую жидкость твердых веществ оказывает существенное влияние на режим движения, приводя к ранней турбулизации потоков.

Для установления наличия ранней турбулентности вязко-пластичной среды были проведены лабораторные исследования по определению режимов движения нефте-песочной смеси и глинистого раствора с добавлением песка [5, 18].

На основании опытных данных установлено, что когда концентрация песка в нефте-песочной смеси равна 200 г/л, нарушение структурного режима происходит при обобщенном параметре Рейнольдса $Re^* < 300$, а турбулентный режим наблюдается при $Re^* > 400$. Для нефте-песочной смеси с концентрацией песка 400 г/л нарушение структурного режима наблюдается при $Re^* < 250$, а при концентрации 600 г/л — при $Re^* < 200$; турбулентность в этих случаях наступает соответственно при $Re^* > 350$ и $Re^* > 300$.

При увеличении концентрации твердых частиц турбулентность наступает при меньших значениях параметра Re^* .

Для определения влияния концентрации твердой фазы на режим движения глинистых растворов был проведен ряд экспериментальных работ в лабораторных условиях. Результаты экспериментальных исследований показывают, что повышение концентрации песка в глинистом растворе приводит к уменьшению τ_0 и η ; для глинистого раствора с обычным содержанием песка при $Re^* = 2000$ еще сохраняется структурный режим, при $Re^* > 3000$ — наступает турбулентный режим.

Введение в глинистый раствор кварцевого песка с фракцией 0.25—0.5 мм от 1 до 30% не приводит к преждевременному нарушению структурного режима и наступлению турбулентного. Увеличение диаметра частиц до 2 мм не оказывает также влияния на режим движения глинистого раствора.

Таким образом, наличие в вязкой жидкости песка (вязко-пластичной среды) приводит к раннему нарушению структурного режима, к ранней турбулизации потока, что не имеет места в глинистых и цементных растворах с добавлением песка. Отмеченное явление, вероятно, объясняется различным количеством иммобилизованной жидкости. Вопрос этот требует дальнейшего экспериментального и теоретического рассмотрения и излагается в порядке постановки.

Рассмотрена возможность определения λ при турбулентном режиме движения на основе теории движения вязко-пластичных сред.

Корреляционный анализ одно- и двухпараметрических зависимостей показал, что при турбулентном режиме движения промысловых буровых растворов величину λ с применением теории вязко-пластичных жидкостей нельзя определить; определить ее можно при использовании фиктивной вязкости.

Исследования показали, что отношение фиктивной вязкости глинистого раствора при турбулентном режиме движения к вязкости воды зависит от концентрации твердой фазы и для различных растворов является постоянной.

Обработка данных, полученных в результате проведенных опытов, показала, что

$$\eta_1 / \eta_2 = 35.6k + 1$$

Здесь η_1 — фиктивная вязкость глинистого раствора при турбулентном режиме, η_2 — вязкость воды, k — концентрация твердой фазы в жидкости.

С целью изучения вопроса взвешивания зернистого материала в восходящем потоке вязко-пластичных сред были проведены экспериментальные исследования. Обработка экспериментальных данных дала возможность вывести путем введения «внутреннего масштаба», предложенного М. Д. Миллионщиковым для пористых сред, эмпирическую формулу для определения высоты взвешивания зернистого материала в восходящем потоке вязко-пластичной среды.

Проведены экспериментальные и гидродинамические исследования обтекания тел вязко-пластичными средами (МГУ им. М. В. Ломоносова). Экспериментальные исследования, приведенные в [8], показали, что при определенных условиях при обтекании затупленных тел вязко-пластичной средой существует передняя застойная зона. Математическая задача об обтекании тела вязко-пластичной средой была сформулирована в [37].

Последовательное движение вязко-пластичных сред встречается в бурении при вытеснении глинистого раствора цементным, в процессе гидравлического разрыва пластов и т. д. Гидродинамическая задача о вытеснении одной вязко-пластичной среды другой в вертикальной цилиндрической круглой трубе рассматривается с учетом различия физико-механических свойств при условии их несмешиваемости. Задача решается приближенно, т. е. пренебрегается влиянием начального участка; определение скоростей на границе обеих жидкостей принимается таким же, как и при стационарном движении одной вязко-пластичной среды при тех же граничных условиях [28, 30].

Для вывода уравнения линии границы раздела сред к моменту появления частиц ядра вытесняющей среды в конечном сечении трубы в случаях

$$\frac{\tau_{02}}{\tau_{01}} > \frac{p_1 - p_2 \pm \gamma_2 L}{p_1 - p_2 \pm \gamma_1 L}, \quad \frac{\tau_{02}}{\tau_{01}} > \frac{p_1 - p_2 \pm \gamma_2 L}{p_1 - p_2 \pm \gamma_1 L} \quad (11)$$

(где τ_{01} , τ_{02} — предельное напряжение сдвига вытесняющей и вытесняемой сред соответственно; p_1 , p_2 — давление в начале и в конце трубы; γ_1 , γ_2 — удельный вес вытесняющей и вытесняемой сред соответственно; L — длина трубы) следует различать три зоны движения.

В первой зоне частицы сред с начала движения до их появления в конечном сечении трубы находятся в упругой области. К третьей зоне относятся частицы, которые с начала до конца их движения находятся в вязко-пластичной области. Картина движения частиц второй зоны будет зависеть от условия (11).

При условии (11.1) частицы этой зоны в начале их движения находятся в упругой области, а затем, к некоторому времени t_0 , переходят в вязко-пластичную область. При условии (11.2) в течение времени t_0 частицы этой зоны движутся в вязко-пластичной области, а с момента $t > t_0$ — переходят в упругую область. В случае

$$\frac{\tau_{02}}{\tau_{01}} = \frac{p_1 - p_2 \pm \gamma_2 L}{p_1 - p_2 \pm \gamma_1 L}$$

вся область движения будет состоять из двух зон — первой и третьей.

Интегрированием уравнения для границы раздела при соответствующих условиях находится уравнение линий границы раздела двух вязко-пластичных сред при их последовательном движении в вертикальной цилиндрической трубе. Пользуясь уравнениями линии границ раздела вытесняющей и вытесняемой сред в соответствующих зонах, можно определить объем оставшейся вытесняемой среды в момент появления первых частиц вытесняющей среды в конечном сечении круглой трубы.

Из полученных выражений следует, что для улучшения полноты вытеснения необходимо подобрать такие цементный и глинистый растворы для данной скважины.

чтобы предельное напряжение сдвига цементного раствора всегда было меньше, а структурная вязкость больше, чем у глинистого раствора. Аналогичная задача решена для последовательного движения двух вязко-пластичных сред между круглыми коаксиальными цилиндрами.

Одной из особенностей целого ряда вязко-пластичных сред (например, глинистого раствора) является способность его со временем изменять структурно-механические свойства. Отмеченное явление, в частности, в значительной степени влияет на гидродинамические условия проводки скважины.

С этой целью была проведена серия экспериментальных работ еще в 1961 г. в АзНИИбурнефть. Экспериментальное исследование равновесия тиксотропных вязко-пластичных сред показало, что ввиду усадки, связанной с ростом структуры, происходит «зависание» глинистого раствора, что приводит к нарушению равновесия в сообщающихся сосудах [29].

Нефти некоторых нефтяных пластов Азербайджана обладают структурно-механическими свойствами. Наличие у этих нефтей структурно-механических свойств в основном связано с содержанием в них парафина и асфальтено-смолистых веществ. Фильтрация вязко-пластичных сред отличается от фильтрации вязких жидкостей. Поэтому вопрос фильтрации вязко-пластичных сред в пористой среде представляет определенный практический и научный интерес.

В 1953 г. была предложена феноменологическая теория фильтрации вязко-пластичных сред в пористой среде [28]. Фильтрация жидкостей при наличии начального градиента давления была рассмотрена в [48], а затем — в [24]. Но с физической точки зрения, начальный градиент давления объяснялся наличием остаточной воды.

В дальнейшем проведены экспериментальные исследования фильтрации вязко-пластичных сред в пористой среде [30]. Принимая во внимание экспериментально полученную прямолинейную зависимость между расходом вязко-пластичной среды и перепадом давления, получен обобщенный закон Дарси в виде

$$v = \frac{k_1 \Delta p}{\eta l} - \frac{\alpha k_1 \tau_0}{\sqrt{k} \eta}, \quad \alpha = \frac{\Delta p_0 \sqrt{k}}{\tau_0 l}$$

Здесь Δp — перепад давления; Δp_0 — перепад давления, расходуемый на преодоление предельного напряжения сдвига; k_1 — проницаемость пористой среды при фильтрации вязко-пластичной среды; l — длина пористой среды; k — воздухопроницаемость; α — постоянный коэффициент.

Для всех опытов α меняется незначительно, в пределах $(162-180) \cdot 10^{-4}$. Это косвенное подтверждение того, что в физическом уравнении $\Delta p_0 = \Delta p_0(\tau_0, l, k)$ учтены основные факторы, влияющие на величину Δp_0 .

В [15] была показана конечность расхода вязко-пластичной жидкости для бесконечной пористой среды.

Экспериментальное исследование относительных фазовых проницаемостей при фильтрации вязко-пластичных сред в пористой среде показало, что кривые фазовых проницаемостей для газа в случае вязкой жидкости (изооктан, вода и трансформаторное масло) совпадают, а кривые в случае вязко-пластичной среды, в зависимости от предельного напряжения сдвига, существенно отличаются. При этом с увеличением τ_0 коэффициент относительной фазовой проницаемости при одном и том же значении средней насыщенности уменьшается.

Исследования коэффициента нефтеотдачи при вытеснении вязко-пластичной нефти газом и водой [14] показали значительное влияние τ_0 на коэффициент нефтеотдачи.

Рассмотрен целый ряд простейших стационарных задач фильтрации несжимаемой вязко-пластичной среды в однородной и неоднородной пористых средах [3, 15]. При нестационарном режиме фильтрации наличие предельного напряжения сдвига приводит к необходимости определения подвижной границы, на которой модуль градиента давления равен модулю градиента давления на преодоление предельного напряжения сдвига. Аналогичная, но уже фиксированная граница имеет место и при стационарном режиме. Некоторые стационарные задачи фильтрации с учетом отмеченных особенностей решены в [3].

При разработке нефтяных месторождений одним из основных параметров является пластовое давление $p_{пл}$. Для определения пластового давления предложен следующий способ. Определяются установившиеся давления при отборе и закачке жидкости. Разность этих давлений будет равна удвоенному давлению, расходуемому на преодоление предельного напряжения сдвига. Тогда

$$p_{пл} = p' + \Delta p_0 = p'' - \Delta p_0$$

Здесь p' — установившееся давление при отборе; p'' — установившееся давление при закачке.

Кривая зависимости $v = v(\Delta p / l)$ может быть аппроксимирована двумя прямыми при сравнительно малых скоростях законом Дарси, а затем — обобщенным законом Дарси. Отмеченная зависимость может быть представлена и как степенная.

Следовательно, закон фильтрации аномальных жидкостей может быть представлен как: (1) закон Дарси при сравнительно малых скоростях, (2) степенной закон. (3) обобщенный закон Дарси для вязко-пластичных жидкостей, (4) комбинация (2) и (3).

Выбор той или иной модели определяется условиями задачи. Так, например, при определении $r_{пл}$ по кривым восстановления давления использование модели (3) позволяет ускорить процесс исследований скважины.

При решении же нестационарных задач, связанных с упруго-водонапорным режимом, могут быть применены как модель (2), так и модель (4). Целесообразность применения той или другой модели и в данном случае определяется математическими трудностями, возникающими при решении конкретной задачи.

Практика откачки вязко-пластичных сред глубинными насосами показала, что структурно-механические свойства таких сред непосредственно обуславливают подачу глубинного насоса. Последнее не имеет места в идентичных условиях при откачке вязких сред.

Это может быть вызвано дополнительным давлением, расходуемым на преодоление предельного напряжения сдвига в системе клапан — цилиндр глубинного насоса и отставанием посадки шарика приемного клапана при ходе плунжера вниз из-за наличия предельного напряжения сдвига. В ряде случаев шарик приемных клапанов не тонут в добываемой вязко-пластичной среде.

На лабораторной глубинно-насосной установке, а также в скважинах изучались изменения коэффициента наполнения в зависимости от изменения физико-механических свойств откачиваемой жидкости, скорости движения плунжера и геометрических размеров приемной части насоса. Опыты показали, что при откачке вязко-пластичных сред коэффициент наполнения насоса резко падает, причем, чем меньше диаметр насадки в приемной части насоса, тем меньше коэффициент наполнения. Коэффициент наполнения резко снижается с увеличением скорости движения плунжера.

Вышеуказанное явление не наблюдается при откачке воды и нефти, не обладающей предельным напряжением сдвига, а имеющей вязкости соответственно 1, 16 и 160 *сгз*.

Кривая зависимости коэффициента наполнения от скорости движения плунжера и для вязкой жидкости, вероятно, имеет два характерных участка, т. е. до определенной скорости движения плунжера коэффициент наполнения не изменяется практически (первый участок), а после определенной скорости движения плунжера — уменьшается (второй участок). Для вязко-пластичной среды первый участок на кривой зависимости коэффициента наполнения от скорости движения плунжера практически отсутствует.

Одной из важных задач в глубинно-насосном способе добычи нефти является увеличение производительности.

Целью работ, начатых в 1962 г., являются предотвращение утечки жидкости путем создания гидравлического затвора из специальной смеси (вязко-пластичной среды) между столбом жидкости в насосных трубах и зазором плунжерной пары. Рассмотрен ряд задач, решения которых легли в основу конструирования глубинных насосов с гидрозатвором [49].

Полученные решения показали, что при надлежащем выборе структурно-механических свойств смеси можно добиться устранения классности глубинных насосов, осуществить рентабельную эксплуатацию глубинных насосов, пришедших в негодность.

Вязко-пластичная среда, применяемая в качестве гидравлического затвора в глубинных насосах, должна иметь следующую характеристику: а) структурно-механические параметры, обеспечивающие заданную минимальную утечку, или же непроницаемость в зазор; б) удельный вес, превышающий удельный вес пластовой жидкости; в) нерастворимость в нефти и воде; г) устойчивость к изменению температуры в скважинах и т. д.

Проведенные экспериментальные исследования показали правильность теоретических предположений.

Промышленные испытания глубинных насосов с гидравлическим затвором подтвердили их надежную работу.

Проведение тепловых расчетов, связанных с бурением и эксплуатацией нефтяных скважин, наряду с теоретическим, представляет и практический интерес. Теплообмен имеет место в процессе промывки и цементирования скважины и при добыче парафинистой нефти.

Задача о теплообмене при движении в трубах вязко-пластичных сред решена при установившемся течении тепла [27, 28]. Отметим работу [27], в которой получены инвариантные решения некоторых теплообменных задач. Точная постановка задачи об

учете изменения температуры во времени приводит к системе нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, решение которых связано с большими трудностями. В связи с этим при нестационарном теплообмене аргумент времени вводится при рассмотрении подобных задач или путем использования метода последовательной смены стационарных состояний или приравниванием теплового потока на стенке скважины действию мгновенных источников на оси или на стенках скважины. Причем последний прием обеспечивает высокую точность, и сопоставление результатов с расчетами по эталонным решениям показало практически допустимое расхождение.

Отметим, что в основном в этом направлении решены простейшие задачи, представляющие собой естественное обобщение соответствующих задач для вязких жидкостей.

Таким образом, исследования, проведенные с 1953 г. и особенно интенсивно в последние пять лет, показали, что ряд нефтей Советского Союза обладает в пластовых условиях вязко-пластичными свойствами. Отмеченные свойства приводят к особенностям как при разработке, так и в процессе нефтедобычи. Поэтому одним из главных направлений должна быть разработка гидродинамики и теории фильтрации вязко-пластичных сред применительно к нефтедобыче.

Надо отметить, что приведенная библиография далеко не полная. Более подробную библиографию можно найти в [10, 28, 30, 37, 39, 46, 50].

Поступило 1 II 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Аббасов А. А. О теории Рейнера и Ривлина для ротационного вискозиметра. Докл. АН Азерб. ССР, 1962, т. 18, № 8.
2. Аббасов А. А. О нестационарном движении вязко-пластичной жидкости между вращающимися и неподвижными коаксиальными цилиндрами. Изв. АН Аз. ССР. Сер. физ.-матем. и техн. наук, 1963, № 4.
3. Алишаев М. Г., Вахитов Г. Г., Гетман М. М., Глумов И. Ф. О некоторых особенностях фильтрации пластовой девонской нефти при пониженных температурах. Изв. АН СССР. МЖГ, 1966, № 3.
4. Астрахан И. М., Григорян С. С. О полной системе уравнений сжимаемой вязко-пластичной жидкости. ПММ, 1959, т. 23, вып. 6.
5. Багиров М. К. О режимах движения нефтепесочной смеси в трубах. Азерб. нефт. х-во, 1965, № 2.
6. Бахшиян Ф. А. Вращение жесткого цилиндра в вязко-пластичной среде. ПММ, 1948, т. 12, вып. 6.
7. Бельзеров В. Б., Знаменский В. А., Листров А. Т. О течении вязко-пластичной среды в трубах некруглого сечения. ПМТФ, 1965, № 4.
8. Булина И. Г., Савин В. Г. Образование передней застойной зоны при обтекании затупленных тел вязко-пластичной жидкостью. Докл. АН СССР, 1962, т. 145, № 1.
9. Быковцев Г. И., Чернышев А. Д. О вязко-пластичном течении в некруглых цилиндрах при наличии перепада давления. ПМТФ, 1964, № 4.
10. Воларович М. П. Исследование реологических свойств дисперсных систем. Коллоидн. ж., 1954, т. 16, № 3.
11. Воларович М. П., Гуткин А. М. Течение пластично-вязкого тела между двумя параллельными плоскими стенками и в кольцевом пространстве между двумя коаксиальными трубами. Ж. техн. физ., 1946, т. 16, № 3.
12. Воларович М. П., Гуткин А. М. Некоторые вопросы теории течения вязко-пластичной среды. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, № 9.
13. Гасанов Г. Т., Мирзаджанзаде А. Х. Решение обратных задач нестационарного движения вязко-пластичной жидкости. ПМТФ, 1962, № 5.
14. Гейман М. А., Фридман Р. А. Влияние структурно-механических свойств вытесняемой нефти на остаточную нефтенасыщенность. Нефт. х-во, 1956, № 9.
15. Георгице Шт. И. О движении вязко-пластичных жидкостей в пористой неоднородной среде. ПМТФ, 1966, № 1.
16. Гукасов Н. А. Об одном случае движения цилиндрического тела в вязко-дисперсной системе. Коллоидн. ж., 1954, т. 16, № 1.
17. Гурбанов С. Г. Приближенные решения задач о круговом нестационарном движении вязко-пластичной дисперсной системы в круглой цилиндрической трубе. Коллоидн. ж., 1964, т. 26, № 5.
18. Гурбанов Р. С., Хасаев Р. М. Об определении турбулентной вязкости глинистых растворов. Азерб. нефт. х-во, 1965, № 6.
19. Ибрагимов В. А., Ивлев Д. Д. Об уравнениях вязко-пластического тела при заданных потенциалах. Изв. АН СССР. ОТН, Механика и машинострое-

20. Ильюшин А. А. Деформация вязко-пластичного тела. Уч. зап. МГУ. Механика, 1940, вып. 39.
21. Ишлинский А. Ю. Пространственное деформирование не вполне упругих и вязко-пластических тел. Изв. АН СССР. ОТИ, 1945, № 3.
22. Ишлинский А. Ю. Об устойчивости вязко-пластического течения полосы и круглой трубы. ПММ, 1943, т. 7, вып. 2.
23. Ким А. Х. Некоторые вопросы реологии вязко-пластичных дисперсных систем. Минск, 1960.
24. Котов А. И., Нерпин С. В. Водоупорные свойства глинистых почв и грунтов и природа начальных градиентов фильтрации. Изв. АН СССР. ОТИ, Механика и машиностроение, 1958, № 9.
25. Кочетков А. М. Приближенные решения некоторых задач нестационарного движения вязко-пластической среды. ПММ, 1950, т. 14, вып. 4.
26. Лейбензон Л. С. Элементы математической теории упругости. М.—Л. Гостехиздат, 1943.
27. Леонова Э. А. Групповая классификация и инвариантные решения уравнений течения и теплообмена вязко-пластической среды. ПМТФ, 1966, № 4.
28. Мирзаджанзаде А. Х. Вопросы гидродинамики вязко-пластичных и вязких жидкостей в нефтедобыче. Баку, Азнефтеиздат, 1959.
29. Мирзаджанзаде А. Х., Сеид-Рза М. К., Шерстнев Н. М., Агаев М. Х. Экспериментальное исследование равновесия тиксотропных вязко-пластичных жидкостей. Азерб. нефть. х-во, 1965, № 2.
30. Мирзаджанзаде А. Х., Мирзоян А. А., Гевинян Г. М., Сеид-Рза М. К. Гидравлика глинистых и цементных растворов. М., «Недра», 1966.
31. Мовсумов А. А. Гидродинамические причины осложнений при проводке нефтяных и газовых скважин. Баку, Азернефр, 1965.
32. Мосолов П. П., Мясников В. П. Вариационные методы в теории течений вязко-пластичной среды. ПММ, 1965, т. 29, вып. 3.
33. Мосолов П. П., Мясников В. П. О застойных зонах течения вязко-пластической среды в трубах. ПММ, 1966, т. 30, вып. 4.
34. Мясников В. П. О сдавливании вязко-пластичного слоя жесткими плитами. Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1963, № 4.
35. Мясников В. П. Течение вязко-пластичной среды при сложном сдвиге. ПМТФ, 1964, № 5.
36. Мясников В. П. Некоторые точные решения для прямолинейных движений вязко-пластической среды. ПМТФ, 1961, № 2.
37. Мясников В. П. О постановке задачи обтекания тел вязко-пластичной жидкостью. ПМТФ, 1962, № 4.
38. Прагер В. Линеаризация в теории вязко-пластичных сред. Механика. Сб. перев. и обз. ин. период. лит., 1962, № 2.
39. Рейнер М. Реология, М., «Наука», 1965.
40. Розенберг Г. Д. Экспериментальные исследования неустановившегося течения вязко-пластичных жидкостей в трубах. Изв. высш. учебн. заведений. Нефть и газ, 1960, № 10.
41. Сафрончик А. И. Неустановившееся течение вязко-пластичного материала между параллельными стенками. ПММ, 1959, т. 23, вып. 5.
42. Сафрончик А. И. Вращение цилиндра с переменной угловой скоростью в вязко-пластичной среде. ПММ, 1959, т. 23, вып. 6.
43. Соколовский В. В. Одномерные нестационарные движения вязко-пластической среды. ПММ, 1949, т. 13, вып. 6.
44. Stegenmeir G. L., Matthews C. S. A study of anomalous Pressure Build-Up Behavior. J. Petrol. Technol., 1958, vol. 10, No. 2.
45. Тябин Н. В. Некоторые вопросы теории движения вязко-пластичных дисперсных систем. Коллоидн. ж., 1953, т. 15, № 4.
46. Уилкинсон У. А. Неньютоновские жидкости. М., «Мир», 1964.
47. Finzi. Atti della Akademia Nozionale dei Lincei, 1936, vol. 23, No. 10.
48. Флорин В. А. Основы механики грунтов. т. I. Общие зависимости и напряженное состояние оснований сооружений. М., Госстройиздат, 1959.
49. Хасаев А. М. Вопросы практического применения вязко-пластичных жидкостей в нефтедобыче. Сб. АЗИНТИ, 1964.
50. Шищенко Р. И. Гидравлика глинистых растворов. Баку, Азнефтеиздат, 1951.