

Приведенные результаты подтверждают высокую эффективность предложенного метода.

Библиографические ссылки

1. Арсеньев Г. В. Энергетические установки. – М. : Высш. шк., 1991. – 336 с.
2. Липанов А. М., Алиев А. В. Проектирование ракетных двигателей твердого топлива. – М. : Машиностроение, 1995. – 400 с.
3. Варнатц Ю., Маас У., Диббил Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / пер. с англ. Г. Л. Агафонова; под ред. П. А. Власова. – М. : ФИЗМАЛИТ, 2003. – 352 с.
4. Алиев А. В., Миценкова О. В. Математическое моделирование в технике. – Ижевск : Ин-т компьютерных иссл., 2012. – 456 с.

O. A. Voevodina, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

I. F. Yumanova, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Definition of Chemical Equilibrium Composition of Fossil Fuel Combustion Products

The application of the Mann–Ishikawa iterations (Fejer type processes) for solving large nonlinear systems is considered. The possibilities of using the numerical method are illustrated by the example of the chemical equilibrium composition of fossil fuel combustion products. This problem is reduced to a nonlinear system.

Key words: fossil fuels, chemical equilibrium composition, mathematical model, nonlinear system, algorithm, Mann-Ishikawa iterations.

УДК 622.24

Ю. Н. Шелковникова, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ГИДРОДИНАМИКА ГЛИНОСОДЕРЖАЩЕГО БУРОВОГО РАСТВОРА В НЕФТЯНЫХ СКВАЖИНАХ

Рассмотрены особенности течения глиносодержащих буровых растворов в типовых конструкциях современной нефтяной скважины. Из вариационной постановки задачи рассчитаны характеристики течения при турбулентном режиме. Для ламинарного течения проведено сравнение аналитической и полученной численно зависимостей коэффициента сопротивления от параметра пластичности для круглой трубы. Показано влияние параметра пластичности на распределение скорости в круглой трубе и кольцевом пространстве.

Ключевые слова: скважина, буровой раствор, течение жидкости.

В настоящее время одним из основных объектов при добыче нефти и газа является скважина, для строительства которой используется бурение. Буровая скважина создается путем последовательного разрушения горных пород и выноса их на поверхность. Она сооружается в толще земной коры, имеет круглое сечение различного диаметра и ее глубина составляет от нескольких метров до нескольких километров. Скважины бывают вертикальные, наклонные и горизонтальные. Начало скважины называется устьем, дно – забоем, а боковая поверхность – стволом. Расстояние от устья до забоя по оси ствола – длина скважины, а глубина – проекция длины на вертикальную ось. Строительство скважины включает следующие этапы:

- строительство необходимых наземных сооружений;
- углубление ствола скважины (включает одновременное углубление и промывку скважины);

5. Алемасов В. Е., Дергалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей / под ред. В. Е. Алемасова. – М. : Машиностроение, 1969. – 548 с.

6. Математическое моделирование высокотемпературных процессов в энергосиловых установках / В. Е. Алемасов [и др.]. – М. : Наука, 1998. – 256 с.

7. Соркин Р. Е. Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе: внутренняя баллистика. – М. : Наука, 1983. – 288 с.

8. Вержбицкий В. М. Основы численных методов. – 3-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2009. – 840 с.

9. Юманова И. Ф. О применении метода Вегстейна к нелинейным системам // Современные проблемы математики : Тез. междунар. (44-й Всерос.) молодежной шк.-конф. – Екатеринбург : Ин-т матем. и мех. УрО РАН, 2013. – С. 166–169.

– разобшение пластов (включает последовательное укрепление ствола скважины опускаемыми трубами, соединенными в колонну, и цементирование заколонного пространства);

– освоение скважины (включает вскрытие пласта, крепление призабойной зоны, перфорацию (пробивание отверстия для притока нефти), вызов и интенсификацию притока).

Типовая конструкция буровой скважины приведена на рис. 1, где 1 – направление; 2 – кондуктор; 3 – промежуточная колонна; 4 – эксплуатационная колонна; 5 – цементный камень; 6 – пласт; 7 – перфорация в обсадной трубе и цементном камне [1].

В начале строительства скважины производится бурение на глубину 50...100 м, затем опускается стальная труба диаметром 500 мм, а пространство между стенками трубы и скважины заполняется цементным раствором. Это начальный участок 1 (рис. 1), который называется *направлением* и служит

для предохранения устья скважины от размыва циркулирующим раствором. Далее скважина бурится меньшим диаметром долота (породоразрушающий инструмент) на глубину 500...600 м, в нее опускается труба диаметром 249...273 мм и цементируется, как и направление, до устья. Эта колонна 2 называется *кондуктором* и служит для предотвращения размыва верхних пластов. После установления кондуктора не всегда удается пробурить скважину до проектной глубины из-за прохождения новых осложняющих горизонтов. В данном случае устанавливают и цементируют еще одну колонну 3, называемую *промежуточной*. И только потом устанавливают и цементируют между стенками колонны и скважины *эксплуатационную* колонну 4. Она предназначена для подъема нефти и газа от забоя к устью.

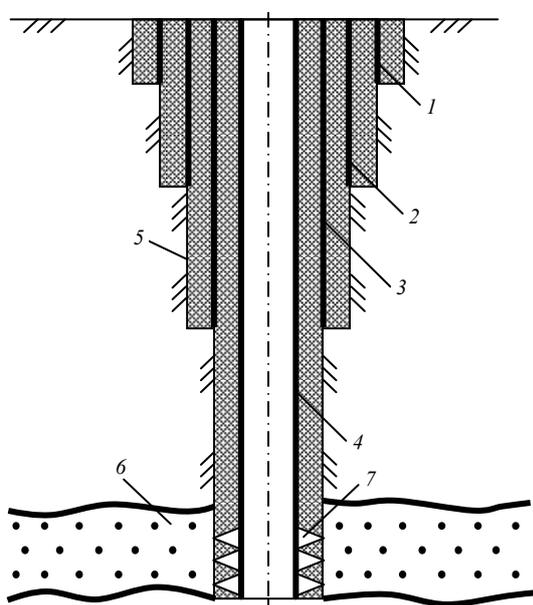


Рис. 1. Типовая конструкция буровой скважины: 1 – направление; 2 – кондуктор; 3 – промежуточная колонна; 4 – эксплуатационная колонна; 5 – цементный камень; 6 – пласт; 7 – перфорация в обсадной трубе и цементном камне

При бурении нефтяных скважин используются в основном два метода – ударный и вращательный. В России применяют исключительно вращательный метод бурения [2]. Различают два вида вращательного бурения – роторный и с забойными двигателями. Долота могут получать вращение либо от двигателей, установленных на поверхности, через колонну труб (роторное бурение), либо от забойных двигателей, расположенных над долотом в скважине (турбинное или электробурение). При роторном бурении углубление долота в породе происходит при движении вдоль оси скважины вращающейся бурильной колонны, а при бурении с забойными двигателями – невращающейся бурильной колонны.

Характерной особенностью вращательного бурения является промывка. Вынос выбуренной породы из скважины осуществляется потоком бурового раствора, который движется вниз по бурильной колон-

не, достигает долота, проходит через имеющиеся в нем отверстия и затем поднимается на поверхность по кольцевому пространству между стенкой скважины и бурильной колонной. Промывка скважины буровым раствором осуществляется в течение всего времени работы долота на забое. Следует отметить, что в процессе турбинного бурения буровой раствор также приводит в движение гидравлический забойный двигатель – турбобур – многоступенчатую осевую турбину, вращающую буровое долото. Таким образом, для промывки скважин и обеспечения работы турбобуров применяются буровые растворы.

Наибольшее распространение получили глинодержателе водные смеси, которые относятся к классу вязкопластических жидкостей. В них вместе с вязкостью проявляются пластические свойства, заключающиеся в наличии предельного напряжения сдвига, после достижения которого возникает текучесть среды [3]. Реологическое уравнение такой жидкости имеет вид

$$\dot{\epsilon} = -\frac{dw}{dr} = \begin{cases} \frac{\tau - \tau_0}{\mu}, & \tau < \tau_0 < \tau_w, \\ 0, & \tau \leq \tau_0, \end{cases} \quad (1)$$

где τ – напряжение трения в любой точке; τ_0 – предельное напряжение; $\dot{\epsilon}$ – скорость сдвига; μ – коэффициент динамической структурной вязкости; w и r – скорость и радиус сечения трубы соответственно.

Вид реологического закона (1) создает определенные трудности при расчете гидродинамики неньютоновских жидкостей. Установившееся течение на продолжительных отрезках бурильных труб и кольцевого пространства с постоянной площадью проходного сечения удовлетворяет безынерционному приближению Стокса [4]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \sigma + f &= 0; \\ \nabla \cdot V &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где σ – тензор напряжений.

В соответствии с вариационным принципом решение дифференциального уравнения $L(v) = f$, где L – положительно определенный оператор, эквивалентно нахождению минимума функционала [5]

$$F(v) = (L(v), v) - 2(v, f),$$

где $(L(v), v)$ – внутреннее произведение.

Вместо уравнения (2) получим для течения в трубах следующую оптимизационную задачу:

$$\int_s \left[\frac{1}{2} \mu \left(\frac{du}{dr} \right)^2 + \tau_0 \left| \frac{du}{dr} \right| - \nabla p \cdot u \right] ds \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$\int_s u ds = G, \quad (4)$$

где s – область интегрирования (проходное сечение); G – объемный расход жидкости; u – продольная скорость; p – давление.

Основная проблема при решении задачи (3), (4) заключается в том, что функционал (3) не дифференцируем в смысле Фреше в том случае, когда функция u тождественно равна постоянной в некоторой области $z \in s$ [6]. При заданном расходе градиент давления выступает в роли множителя Лагранжа. В случае $\mu = \mu_0 = \text{const}$ имеем ламинарный режим течения. При турбулентном режиме коэффициент вязкости зависит от параметров течения.

В работе [7] для решения задачи (3) при заданном градиенте давления предложено применять гибридный генетический алгоритм, преодолевающий трудности, связанные с недифференцируемостью функционала. Для сведения вариационной задачи (3), (4) к задаче нелинейного программирования в области s вводится разностная сетка $\{r_j, j = \overline{0, n}\}$ и сеточная функция $\{u_j, j = \overline{0, n}\}$. Производная скорости аппроксимируется конечноразностной формулой $\frac{du}{dr} \approx \frac{u_j - u_{j-1}}{r_j - r_{j-1}}$, интегрирование (3), (4) проводится методом Симпсона. Далее решается задача оптимизации с неизвестными переменными u_j .

Для ламинарного режима течения полученный профиль скорости с точностью до 0,1 % согласуется с известным аналитическим решением из работы [3] (рис. 2) при числе Рейнольдса $Re = \frac{\rho D \omega}{\mu_0} = 1800$ и параметре пластичности $\Pi = \frac{\tau_0 D}{\mu_0 \omega} = 27$ (где применяются обозначения: D – диаметр трубы; $\omega = \frac{4G}{\pi D^2}$ – средняя по сечению скорость).

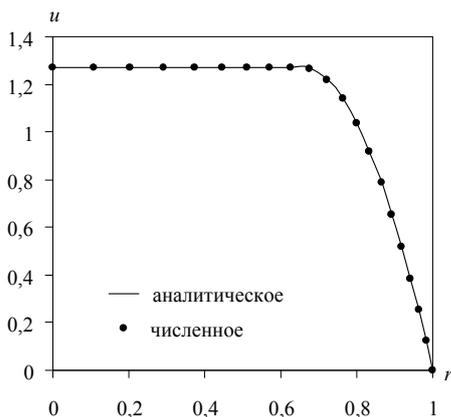


Рис. 2. Зависимости продольной скорости от радиуса сечения трубы

На рис. 3 представлено сравнение аналитической и полученной численно зависимостей коэффициента сопротивления λ от параметра пластичности Π . Коэф-

фициент сопротивления для ламинарного течения при $\Pi = 0$ описывается известной зависимостью $\lambda = \frac{64}{Re}$.

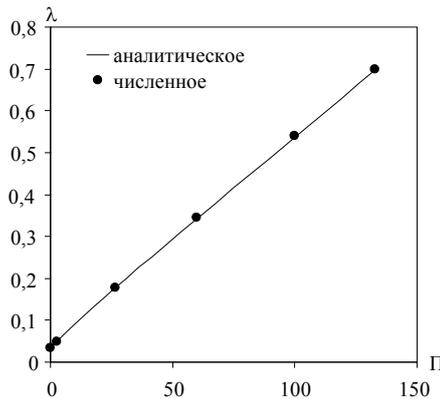


Рис. 3. Зависимости коэффициента сопротивления λ от параметра пластичности Π

Для турбулентного режима, характерного для буровых труб, аналитические зависимости для коэффициента сопротивления при параметре пластичности $\Pi > 0$ отсутствуют. Для получения значений коэффициента сопротивления в круглой трубе и кольцевом пространстве в случае $\Pi > 0$ задачу (3), (4) будем решать с использованием модели турбулентности, использующей понятие длины пути смешения l [3]. В соответствии с этой моделью

$$\mu = \mu_0 \left(1 + l^2 \left| \frac{du}{dr} \right| \right).$$

Путь смешения определяется формулой

$$l = R \left[0,14 - 0,08 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 0,06 \left(\frac{r}{R} \right)^4 \right],$$

где $R = \frac{D}{2}$ – радиус трубы.

Для нулевого параметра пластичности (рис. 4) показано сравнение профилей скорости в круглой трубе, полученных численно из решения задачи (3), (4) и эмпирически [3].

Удовлетворительное согласование по распределению скорости и удовлетворение эмпирическому закону сопротивления для турбулентного течения в круглых трубах $\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$ дает возможность

вычислять коэффициент сопротивления из решения задачи (3), (4) при $\Pi > 0$.

Влияние параметра пластичности на распределение скорости в круглой трубе показано на рис. 5. Большие значения предельного напряжения τ_0 , так же, как и при ламинарном режиме, приводят к течению с выраженным ядром, где вязкопластическая жидкость движется как твердое тело.

В кольцевом пространстве влияние параметра пластичности на профиль скорости показано на рис. 6.

Расчеты проведены для числа Рейнольдса $Re = 37000$.

Коэффициент сопротивления при турбулентном режиме течения вязкопластической жидкости существенно зависит от величины параметра пластичности. На рис. 7 показаны зависимости $\lambda(\Pi)$ для круглой и кольцевой трубы.

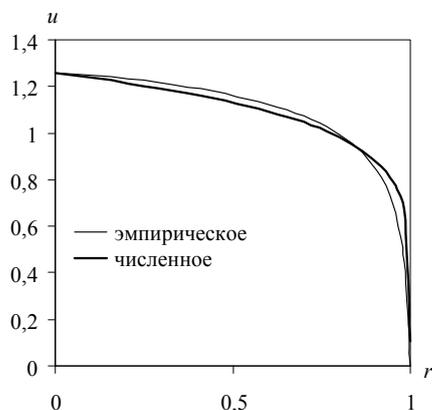


Рис. 4. Профили скоростей в круглой трубе для нулевого параметра пластичности

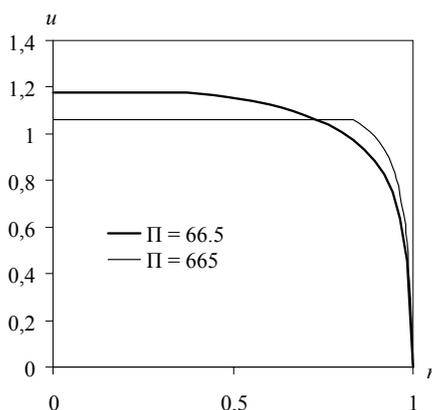


Рис. 5. Зависимости продольной скорости от радиуса сечения трубы

Коэффициент сопротивления для кольцевой трубы для $\Pi = 0$ в несколько раз выше, чем для круглой трубы (значения 0,085 и 0,023 соответственно). При увеличении предельного напряжения до значений $\tau_0 \approx 500$ коэффициенты сопротивления возрастают на порядок.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета пластических свойств буровых растворов при проведении гидравлических расчетов скважин.

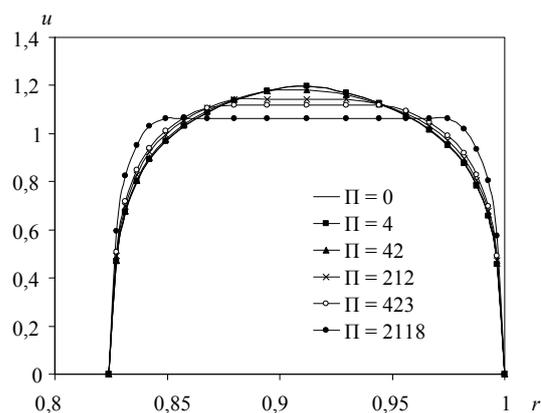


Рис. 6. Зависимости продольной скорости от радиальной координаты

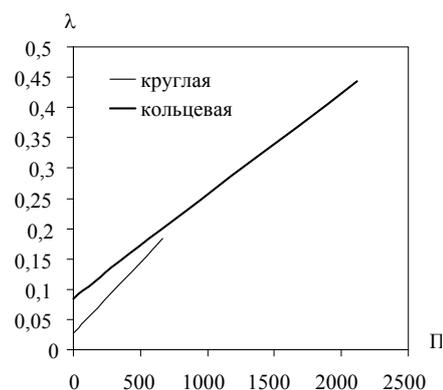


Рис. 7. Зависимости $\lambda(\Pi)$ для круглой трубы и кольцевого пространства

Библиографические ссылки

1. Кудинов В. И. Основы нефтегазопромыслового дела. – М. : Ижевск : Ин-т комп. иссл., УдГУ, 2008. – 720 с.
2. Вадецкий Ю. В. Бурение нефтяных и газовых скважин. – М. : Недра, 1986. – 252 с.
3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.
4. Муравлева Л. В., Муравлев Е. А. Итерационный метод расчета течений вязкопластической среды Бингама // Вычислительные методы и программирование. – 2012. – Т. 13. – С. 161–171.
5. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галлеркина. – М. : Мир, 1988. – 352 с.
6. Федоренко Р. П. Введение в вычислительную физику. – М. : Изд-во МФТИ, 1994. – 528 с.
7. Тенев В. А., Якимович Б. А. Генетические алгоритмы в моделировании систем. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2010. – 308 с.

Yu. N. Shelkovernikova, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Hydrodynamics of Clay-Containing Boring Solution in Oil Wells

The features of a current of clay-containing boring solutions in standard designs of a modern oil well are considered. The characteristics of a current at a turbulent mode are calculated according to variation statement of the problem. The comparison of analytic and numerically received dependencies of the coefficient of resistance on the plasticity parameter for a round pipe are carried out for a laminar current. The influence of the plasticity parameter on velocity distribution is shown for a round pipe and a ring space.

Key words: well, boring solution, liquid's current.