

$$\psi = \frac{Q}{\pi a^2} R^2 I_2 + \frac{4a^3}{\mu \pi} (p_\infty - p_a) \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} (n-1)(2n-3)}{(2n-3)(4n-3)} \left(\frac{R}{a}\right)^{2n} \left[n I_{2n} + \frac{2n-3}{2} I_{2n-2} \right]$$

$$V_R = -\frac{Q}{\pi a^2} \tau + \frac{4a(p_\infty - p_a)}{\mu \pi \sqrt{1-\tau^2}} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n (n-1)}{(2n-3)(4n-3)} \left(\frac{R}{a}\right)^{2n-2} \times$$

$$\times \left[n P_{2n-1} + \frac{2n-3}{2} P_{2n-3} \right]$$

$$V_0 = \frac{Q}{\pi a^2} \sqrt{1-\tau^2} - \frac{4a(p_\infty - p_a)}{\mu \pi \sqrt{1-\tau^2}} \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2n(n-1)}{(2n-3)(4n-3)} \left(\frac{R}{a}\right)^{2n-2} \times$$

$$\times \left[n I_{2n} + \frac{2n-3}{2} I_{2n-2} \right]$$

Рассматриваемая задача о выдавливании вязкого вещества через круглое отверстие в безграничной стенке решена в том смысле, что получено замкнутое выражение для давления, справедливое для всей области, расположенной выше стенки, получены разложения для компонент скоростей как в окрестности бесконечно удаленной точки, так и в окрестности начала координат, и получена конкретная формула для зависимости расхода от конечного перепада давления. Так как все коэффициенты разложений для скоростей определены, то нет необходимости исследовать вопрос о сопряжении полученных разложений для каких-то промежуточных значений сферического радиуса. Из сопоставления разложений (2.16) и (2.19) видно что эти два разложения для давления не могут быть отождествлены на полусфере с радиусом $R = a$ в том смысле, что при $R = a$ коэффициенты при полиномах Лежандра с одинаковым индексом могут быть приравнены друг другу; в одном разложении индексы являются нечетными, а в другом — четными. Следовательно, нельзя ставить вопрос об отождествлении в указанном смысле и разложений для скоростей V_0 и V_R на полусфере с радиусом $R = a$.

Для давления линия отверстия в стенке является особой линией, и по этой причине разложения (2.16) и (2.19) могут иметь место при значениях R , отличных от a . Идея использования «внутренних разложений» и «внешних разложений» искомых функций применялась ранее, например, в задаче об асимптотическом пограничном слое. В этом частном случае смыкание внешнего и внутреннего разложений искомой функции оказалось возможным для промежуточного, заранее неизвестного значения независимого переменного по той причине, что для всех промежуточных значений искомая функция была непрерывной. В рассматриваемом случае вопрос о смыкании «внешнего» и «внутреннего» разложений функции тока осложнен не только тем, что это смыкание должно проводиться не в точке, а на некоторой поверхности, но и тем, что линеаризованная постановка задачи не позволяет избежать появления точек разрыва производных искомой функции.

Поступило 4.1.1965

ЛИТЕРАТУРА

1. С л е з к и н Н. А. Движение вязкой жидкости в конусе и между двумя конусами. Матем. сб., 1935, т. 42, № 1.
2. Л а м б Г. Гидродинамика. Гостехиздат, 1947.
3. Г р а д ш т е й н И. С., Р ы ж и к И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и производных. Физматгиз, 1962.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСИЯ ТИКСОТРОПНЫХ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

М. Х. АГАЕВ, А. Х. МИРЗАДЖАН-ЗАДЕ, М. К. СЕИД-РЗА, Н. М. ШЕРСТНЕВ

(Баку)

Одной из особенностей целого ряда вязко-пластичных жидкостей (например, глинистого раствора, применяющегося в качестве промывочной жидкости при бурении скважины) является способность их со временем изменять структурно-механические свойства. Отмеченное явление, в частности, в значительной степени влияет на гидродинамические условия проводки скважины и требует определенных исследований.

С этой целью была проведена серия экспериментальных работ, начатых в АзНИИ-бурнефть еще в 1961 г. В начале опыты проводились на установке, схема которой приведена на фиг. 1, а. Эта установка состояла из колонны I , которая была собрана из втулок известняка апшеронских отложений внутренним диаметром 0.085 м, длиной 0.2—0.25 м. Общая длина колонны составила 16 м. К нижнему концу колонны для измере-

ния давлений на забое подсоединялся образцовый манометр 2, а для предотвращения попадания глинистого раствора в него устанавливался специальный разделитель 3. Методика проведения опыта на данной установке заключалась в следующем.

Колонна заполнялась глинистым раствором и оставлялась определенное время в покое, в течение которого через определенные промежутки времени фиксировались показания манометра.

Результаты проведенных опытов показали, что с течением времени наблюдалось непрерывное снижение давления. Для выяснения физического сущности происходящего явления были поставлены исследования на установке (фиг. 1, б), допускающей более точное проведение экспериментов.

Установка состоит из стеклянной трубки 3 (внутренний диаметр 0.02 м), в которую наливается испытуемый раствор, мерной трубки 1 (внутренний диаметр 0.006 м), заполняемой водой, и промежуточного стакана 2 с ртутью ($d = 0.077$ м). Трубки 1, 3 и стакан 2 соединены резиновым шлангом 4 и представляют собой сообщающиеся сосуды. Стеклянная трубка 3, будучи прикреплена к деревянному щиту 5, имеет возможность вертикально перемещаться, что обеспечивает регулирование уровня жидкостей, выпуск раствора из трубки 3 и ее очистку. Стеклянная трубка 1 прикреплена к деревянному щиту со шкалой, позволяющей следить за возможным изменением уровня во времени.

Высота столбов глинистых растворов, приготовленных из карачухурской глины на морской воде и этих же растворов, обработанных углекислым реагентом, заливаемых в трубку 3, при проведении экспериментов составляла 1.80 м. До начала проведения опытов растворы предварительно подвергались термостатированию и вакуумированию.

Продолжительность эксперимента определялась с момента заполнения трубки 3 раствором до момента прекращения падения уровня в трубке 1.

Из (фиг. 2), построенной на основании экспериментальных данных, видно, что характер снижения уровня воды в трубке 1 для всех применявшихся растворов идентичен и не зависит от их качества и что падение уровня в трубке 1 во времени происходит неравномерно. В начальный период это падение происходит более интенсивно, но со временем затухает, т. е. с увеличением срока выдерживания раствора в покое суммарное значение падения стремится к некоторой постоянной величине.

Для выяснения влияния шероховатости и диаметра ограничивающей поверхности на указанное явление была смонтирована установка, схема которой приведена на фиг. 1, в.

Как видно из схемы, установка состоит из металлической трубки 1 (высота 1.10 м, внутренние диаметры 0.0196, 0.0359, 0.0559 м), имеющей шероховатую внутреннюю поверхность, за счет покрытия ее крупнозернистым песком, нанесенным при помощи клея БФ, наклонной (под углом $39^\circ 10'$) стеклянной трубки 2 (внутренний диаметр 0.0087 м). Трубки 1 и 2 соединены между собой резиновым шлангом 3. Стеклянная трубка 2 служит для фиксации возможного изменения уровня жидкости. Выпуск раствора из трубки 1 производится через переводник 4.

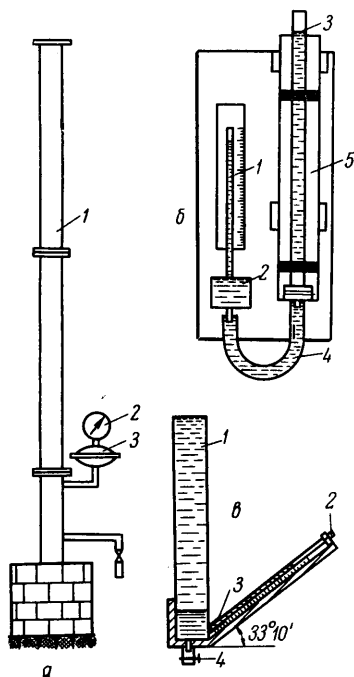
Для проведения опытов при закрытом переводнике 4 через наклонную трубку 2 наливалась ртуть, высота столба которой составляла 0.10—0.15 м. После этого трубка 1 заподвлялась глинистым раствором.

Уравновешенная система ртуть — раствор оставалась в покое не менее суток, в течение которых на шкале 10 отмечалось падение уровня ртути в стеклянной трубке 2. Изменения уровня ртутного столба для ряда растворов изображена на фиг. 3.

Из фиг. 2, 3 видно, что характер изменения уровня ртутного столба при проведении опытов в трубках с шероховатыми поверхностями аналогичен таковому при использовании трубок с гладкими поверхностями и величина падения уровня уменьшается с увеличением поперечных размеров столба раствора.

Таким образом, результаты экспериментов создают впечатление, что как будто давление, создаваемое глинистым раствором уменьшается.

К такому выводу пришли некоторые исследователи [1, 2], предполагая, что это уменьшение давления, которое они называют «разгрузкой» гидростатического давления связано с ростом во времени статического напряжения сдвига глинистого раствора, находящегося в покое.



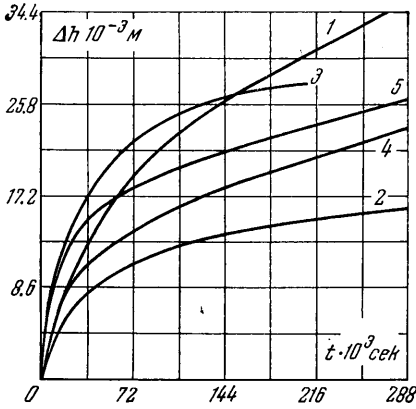
Фиг. 1. Схема установки

Это предположение, казалось, находило подтверждение и в наших опытах, однако лишь до тех пор, пока не был произведен анализ экспериментальных данных с точки зрения предельного равновесия. Результаты последующих экспериментальных исследований показали недостоверность указанного предположения.

Как указано выше, при оставлении раствора в покое с течением времени снижается уровень воды (ртути) в трубке 1 (фиг. 1, б), т. е. ртуть из стакана 2 перемещается в трубку 3 и замещает какой-то объем, ранее занимаемый глинистым раствором. Такое замещение, если следовать рассуждению авторов [1, 2], должно было сопровождаться сдвигом столба покоящегося глинистого раствора и перемещением верхнего уровня.

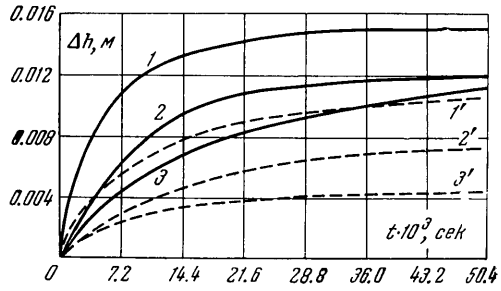
До начала структурообразования давление столба глинистого раствора p_1 , уравновешенное столбом ртути и воды, определяется зависимостью

$$p_1 = H\gamma - 4H\theta / d \quad (1)$$



Фиг. 2

Фиг. 2. Снижение уровня воды в зависимости от времени 1 — раствор из карахурской глины на морской воде, вязкостью по СПВ-5 — 30 сек, 2 — раствор 1 с добавкой 1% щелочи, 3 — раствор 1, обработанный УЩР с добавкой 0,3% CaCl₂, 4 — раствор 1, обработанный УЩР, 5 — раствор 1, вязкостью по СПВ-5 — 60 сек



Фиг. 3

Фиг. 3. Снижение уровня ртути во времени при применении раствора из карахурской глины на пресной воде (1, 2, 3) и того же раствора, обработанного УЩР (1', 2', 3'), соответственно в трубках диаметром 0.0196, 0.0359, 0.0559 м

Здесь p_1 — давление столба глинистого раствора, H — высота столба глинистого раствора, γ — удельный вес глинистого раствора, θ — статическое напряжение сдвига глинистого раствора в начальный период, d — внутренний диаметр трубки 3 (фиг. 1, б).

Давление p_2 , необходимое для сдвига столба глинистого раствора, находящегося в статическом состоянии, определяется из условия

$$p_2 = H\gamma + 4H\theta_1 / d \quad (2)$$

где θ_1 — статическое напряжение сдвига глинистого раствора по истечении некоторого времени.

Из (1) и (2) имеем

$$p_1 < p_2 \quad (3)$$

Следовательно, давление p_1 , создаваемое ртутным столбом, в начальный период меньше, чем давление, необходимое для сдвига глинистого раствора, находящегося некоторое время в покое. Поэтому оно не в состоянии преодолеть давление столба глинистого раствора, оставшегося продолжительное время в покое.

Исходя из этого, можно заключить, что снижение уровня ртути и перемещение ее происходят не за счет падения давления столба глинистого раствора, а за счет какого-то другого явления.

Для проверки справедливости зависимости (3) были проведены специальные эксперименты.

Уравновешенный ртутью столб глинистого раствора (фиг. 1, а) в течение определенного времени оставался в покое. Затем в трубку 2 доливалась ртуть до начала сдвига глинистого раствора, или наоборот, в трубку 1 доливался раствор до начала сдвига ртути. Результаты опытов для трубки диаметром $d_1 = 0.0196$ м приведены в таблице, показывают, что дополнительное усилие для сдвига глинистого раствора, оставшегося в покое в течение t сек, со временем увеличивается и значительно выше первоначального давления, создаваемого столбом глинистого раствора. В табл. обозначено Δh — снижение уровня ртутного столба, l — высота избыточного столба, необходимого для нарушения равновесия (все значения относятся к ртути, отмеченные звездочками к глинистому раствору).

γ , н/м ³	T, сек	θ , н/м ²		H, м	t, сек	Δh , м	r, м
		за 60 сек	за 600 сек				
17 150	135	26.20	28.81	1.04	0	0	0.038
16 170	45	4.41	14.70	1.06	5 400	0.005	0.090
16 170	45	4.41	14.70	1.06	9 000	0.010	0.100
16 464	43	2.94	13.03	1.06	3 600	0.003	0.080
16 464	43	2.94	13.03	1.06	14 400	0.004	0.100
16 758	60	—	—	1.06	18 00	0.002	0.250*
17 346	110	13.92	22.83	1.06	5 400	0.003	0.50

Таким образом, полученные результаты подтверждают справедливость неравенства (3).

Кроме того, как отмечено выше, если сдвиг столба глинистого раствора при падении уровня ртути имел бы место, то уровень его должен был бы подниматься. Однако при наблюдении за уровнями глинистых растворов было обнаружено, что последние не только не поднимаются, а наоборот, падают.

Для изучения причин этого явления были проведены специальные опыты. Для этого были взяты три металлические трубки одного диаметра. В первой трубке нижний конец соединялся с дифференциальным манометром, а верхний был герметически закрыт; во второй трубке с дифференциальным манометром соединялся верхний конец, а нижний был герметически закрыт; в третьей трубке оба конца соединялись с дифференциальными манометрами.

Как показали проведенные эксперименты, снижение уровней в дифференциальных манометрах имело место во всех случаях как сверху, так и снизу.

Это явление объясняется тем, что при оставлении глинистого раствора в статическом состоянии коагуляционные процессы приводят к более плотному расположению мицелл и, как следствие, — к сокращению объема (усадке), а также зависанию глинистого раствора на границе контакта его со стенками трубы. На возможность зависания жидкости в этом случае было указано Л. И. Седовым.

Экспериментальные исследования по определению усадки глинистых растворов при высоких давлениях привели к аналогичным качественным результатам.

Опыты, проведенные с растворами из тампонажного цемента, указывают на идентичность происходящего явления с той лишь разницей, что процесс протекает в более короткие сроки, определяемые началом и концом его схватывания.

Таким образом, рассмотрение этого явления как причины, приводящей к разгрузке гидростатического давления, следует считать не обоснованным.

Не безынтересно также отметить, что, согласно проведенным опытам в нетиксотропных вязко-пластичных жидкостях отмеченное явление не наблюдалось.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили сделать следующие заключения.

1. При оставлении глинистых растворов в статическом состоянии имеет место усадка, а также зависание их на стенах труб, вызываемых нарастанием структуры во времени.

2. Величина усадки уменьшается с увеличением поперечных размеров столба раствора и снижением давления в системе.

3. Характер изменения усадки во времени аналогичен изменению статического напряжения сдвига.

4. При прочих равных условиях увеличение шероховатости будет приводить к росту усадки.

5. Наличие усадки глинистого раствора не приводит к изменению гидростатического давления.

Поступило 13 V 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайворонский А. А., Фарукшин Л. Х., Шулъга Г. П. О гидростатическом давлении глинистых и цементных растворов в стволе скважины. Науч.-техн. и тематические обзоры, ЦНИИТЭнефтегаз, 1963.
2. Крепление скважин и разобщение пластов (материалы, состоящегося во ВНИИБТ в октябре 1962 г. семинара по формированию цементного камня). Изд-во «Недра», 1964.