

Р. А. Гасанов, д-р техн. наук¹; **Ш. Х. Бекиров**, д-р техн. наук²;
А. Р. Гасанов, канд. техн. наук³; **А. И. Зейналов**⁴; **Д. Р. Гасимова**, докторант¹;
Т. А. Асланов,²; **Ш. С. Мусаев**, магистр⁵.

¹ Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности,
г. Баку, e-mail: ramizhasanov52@hotmail.com, gasymova1974@list.ru

² ООО «Сокарупстрим Менеджмент Интернеинл», г. Баку, Азербайджан,
e-mail: shaig.bekirov@socarupstream.az

³ Трест Комплексные буровые работы ГНКАР, г. Баку, Азербайджан
e-mail: alish.hasanov@socar.az

⁴ СП "Мелководье Абшерона", e-mail: zeynalai@bp.com

⁵ Университет науки и технологий, Норвегия, e-mail: shamsimusayev7@gmail.com

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КОЛОНН С ОКРУЖАЮЩИМ МАССИВОМ ПОРОД И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Приведен анализ промыслово-статистического материала по смятиям эксплуатационных колонн, на основе которого установлено, что их причинами, в основном, являются нарушение технологических режимов освоения и эксплуатации скважин, низкое качество цементирования колонн, несоответствие рецептуры цементного камня требуемым его реофизическим и механическим характеристикам, наличие заколонных слоев вязко-пластичных пород с ярко выраженными характеристиками ползучести. Определено пороговое значение предела текучести материала серединного слоя трехслойной конструкции, классифицирующее ее приемлемость по прочностным свойствам. Определен класс пригодных и непригодных материалов для цементного камня по пороговому значению предела их текучести, имеющих конкретное конструктивное исполнение и установленный режим нагружения. Получено уравнение для определения несущей способности цементного камня в конструкции Т–ЦК–П с учетом ее метрических характеристик.

Ключевые слова: трехслойная конструкция, механическая характеристика, пороговое значение, пригодный и непригодный класс, несущая способность, совместимость, метрическая характеристика.

Актуальность проблемы

На данном историческом этапе развития мировой экономики регион Каспийского моря является и признан мировыми супердержавами одним из наиболее перспективных. Объясняется это тем, что сегодня в этом регионе с участием передовых нефтегазовых компаний Запада и Востока реализуются всемирно значимые энергетические проекты. Ведущая роль в этих проектах отведена Азербайджанской Республике, имеющей более чем 100 летний опыт развития топливно-энергетического комплекса.

В настоящее время с участием Азербайджана при партнерстве с ведущими компаниями мира заключено около 30 международных контрактов по разработке богатых энергоносителями нефтегазовых месторождений суши и Азербайджанского сектора шельфа Каспийского моря. Поставлена задача увеличения годовых добычных возможностей Азербайджанских месторождений на уровень 50 и более млн. тонн нефти, а также 25 млрд. м³ природного газа. Для достижения и реализации указанных пределов по добыче нефти и газа необходимо сохранение и увеличение фонда действующих скважин. Поэтому, согласно производственным программам соответствующих проектов, предполагается увеличение объема буровых работ как международными консорциумами, так и Государственной Нефтяной Компанией АР. Не менее значимым в этом контексте является предупреждение

возникновения осложнений и аварийных ситуаций в процессах бурения, освоения и эксплуатации скважин по различным причинам.

Наиболее распространенной и сложной по классификации аварией в нефтегазодобыче является авария с эксплуатационными колоннами скважин, сводимая к потере ее проходного сечения в результате смятия боковым горным давлением и проявлением других техногенных факторов. Причем потеря проходного сечения эксплуатационной колонной может иметь место в различных интервалах скважин и существующими техническими средствами и применяемыми технологическими регламентами в большинстве случаев восстановлению не подлежит. Объясняется это горно-геологической (возникновение геодинамических процессов в недрах земной коры, наличие вдоль ствола скважины заколонных глинистых пластичных пород и т.д.), технической (геометрические параметры конструкции скважин, параметры бурового раствора и цементного камня и т.д.) и организационной (несовершенство используемых методик по конструированию ствола скважины) причинами их возникновения.

Анализ промыслово-статистических материалов по ПО «Азнефть» свидетельствует о большой частоте аварий в виде смятия эксплуатационных колонн, и как результат, ликвидации скважин из-за потери их проходного сечения. Если принять во внимание, что строительство скважин средней глубины в условиях морского шельфа Азербайджана оценивается стоимостью (30÷50) млн. \$ США, то значимость этой проблемы приобретает весьма существенное производственно-экономическое содержание. Поэтому необходимо и требуется проведение соответствующих научно-исследовательских работ для предупреждения явлений смятия эксплуатационных колонн путем внедрения их результатов в практику проектирования и строительства ствола скважины.

Однако, внедрение регламентов предупреждения аварий не исключает необходимость разработки и внедрения технологических регламентов с соответствующим техническим оснащением для ремонта и восстановления (реновации) скважин после потери их проходного сечения за счет смятия эксплуатационной колонны. Предупреждение аварии и ликвидация ее последствий являются мероприятиями, направленными на увеличение межремонтного периода и реанимацию аварийных скважин. При неуспешной реализации подобных мероприятий возникает необходимость утилизации ствола аварийной скважины по причине потери проходного сечения эксплуатационной колонны до ее ликвидации. Это направление промыслово-производственной деятельности также нуждается в создании, исследовании и внедрении эффективных техники и технологии.

В связи с этим следует отметить, что содержание исследований всех направлений ведения работ по реновации скважин имеют экономическую перспективность, а решение проблемы является весьма актуальной для топливно-энергетического комплекса любой нефтегазодобывающей страны.

Цель работы

Исследование причин аварийной потери проходного сечения скважин в результате смятия эксплуатационных колонн, разработка и внедрение научно-технических решений для их предупреждения и ликвидации последствий, а также утилизации стволов ликвидированных скважин.

В связи с этим, проанализированы причины потери проходного сечения эксплуатационных колонн скважин и возможные последствия этого явления для нефтегазодобывающей промышленности страны. Отмечено важное значение этой проблемы и необходимость разработки эффективных рекомендаций для предотвращения выхода из строя скважин в результате смятия их колонн и борьбы с их последствиями, вплоть до утилизации стволов аварийно бесперспективных скважин.

Для достижения желаемого уровня развития технологий и технических средств для реализации всех направлений работ с указанной категорией скважин, включая предупреждение, восстановление и утилизацию, предлагается решение нижеприводимого круга задач:

1. Изучение промыслово-статического материала по нарушениям эксплуатационных колонн скважин на месторождениях ГНКАР для ранжирования причин этих явлений по степени значимости и определения содержания исследовательских задач.

2. Разработка механической и математической моделей и решение задачи взаимодействия зацементированной колонны с окружающим массивом пород в процессе эксплуатации скважин при различных сочетаниях физико-механических и реологических свойств материалов труб колонны, заколонного цемента и пород.

3. Изучение влияния геодинамических процессов, происходящих в недрах земли, на показатели работоспособности и качества эксплуатационных колонн скважин.

4. Исследование напряженного состояния и оценка несущей способности эксплуатационной колонны скважин при больших деформациях (геометрической нелинейности) с учетом температурно-силовых на них воздействиях.

5. Разработка и внедрение научно-технических решений, направленных на предотвращение аварий с эксплуатационными колоннами скважин и увеличения показателей их качества и работоспособности.

6. Оценка влияния технологических несовершенств в виде отклонения от правильной геометрии на показатели несущей способности эксплуатационной колонны при ее температурно-силовом нагружении.

7. Моделирование напряженно-деформированного состояния смятой части труб эксплуатационной колонны скважин для определения предельных возможностей их восстановления.

8. Выбор и обновление технологии нагружения смятой внутренней поверхности труб и разработка соответствующих технических средств для воспроизведения необходимых режимов и пределов их параметров.

9. Исследование взаимодействия внутрискважинных инструментов с телом труб эксплуатационных колонн в процессе отрезки при реализации технологий утилизации стволов ликвидированных скважин.

10. Разработка, реализация конструкций и внедрение научно-обоснованных технических решений для повышения эффективности процессов восстановления смятой части эксплуатационных колонн и отрезки ее участков.

Целью всех работ, направленных на исследование напряженно-деформированного состояния эксплуатационных колонн является выявление причин и характера нарушений целостности их труб в периоды освоения и эксплуатации скважин, а также разработка мероприятий по предотвращению аварий с эксплуатационными колоннами [1-3].

Несмотря на многочисленность исследований работоспособности и качества эксплуатационных колонн и внедрения [4, 5] их результатов на практике, выход из действующего фонда скважин из-за потери их проходного сечения является одним из распространенных видов аварий, приносящей большой ущерб нефтегазовой промышленности.

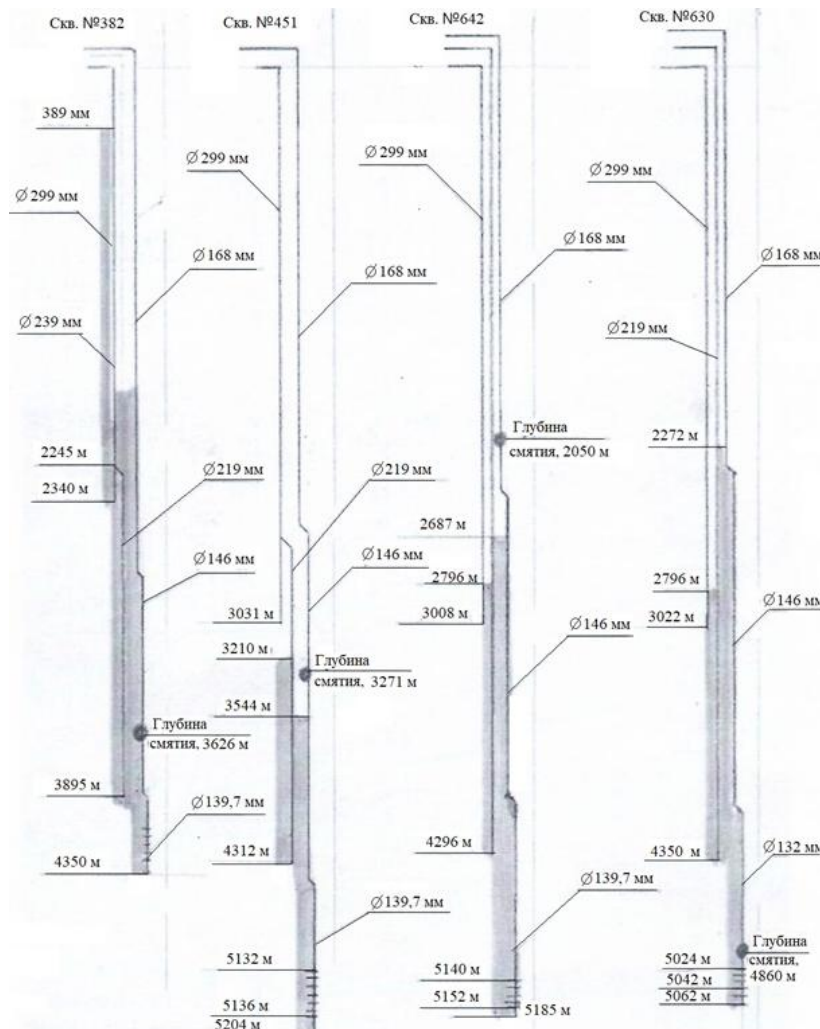
Работы по ликвидации этих нарушений и их последствий очень трудоемки, требуют вложения больших инвестиций и не всегда успешны [6].

В результате анализа фонда аварийных скважин ряда НГДУ объединения "Азнефть" за последние несколько лет обнаружено, что около 80 % нарушений с эксплуатационными колоннами происходит вне зоны гидродинамической связи скважины с продуктивным горизонтом (табл. 1).

Таблица 1. Аварийность в процессе эксплуатации

Вид нарушения	Количество нарушений						
	Зона фильтра			Выше фильтра	Ниже фильтра	Всего	%
	Верх	Середина	Низ				
I. По Балаханьнефть							
1. Слом с отводом в сторону	48	4	-	127	-	179	48,6
2. Слом и смятие	60	20	4	84	8	176	47,8
3. Прочие	9	4	-	-	-	13	3,6
Всего:	117	28	4	211	8	368	100
II. По Карадагнефть							
1. Слом с отводом в сторону	22	10	1	40	-	73	54,5
2. Слом и смятие	9	14	5	28	2	58	43,3
3. Прочие	2	1	-	-	-	3	2,2
Всего:	33	25	6	67	2	134	100

Изучение же аварийных скважин по срокам службы их эксплуатационных колонн свидетельствует о наличии 3-х групп по этому показателю. А именно, скважины группируются [7, 8] на:



- со сроком службы эксплуатационной колонны до 2-х лет;
- со сроком службы от 2-х до 10 лет;
- со сроком службы эксплуатационной колонны более 10 лет.

Следует отметить, что если 3-я группа нарушений является следствием старения за счет воздействия внешних механических факторов [9], то первые две группы нарушений объясняются в основном отклонением от установленных технологических параметров освоения и эксплуатации.

Причем характерны эти негативные явления в основном для глубоких скважин, о чем свидетельствуют приводимые конструкции скважин (рис.1-4) и данные таблиц 2 и 3.

Рис. 1. Конструкция скважин с цементированным забоем № 382, 451, 642, 630

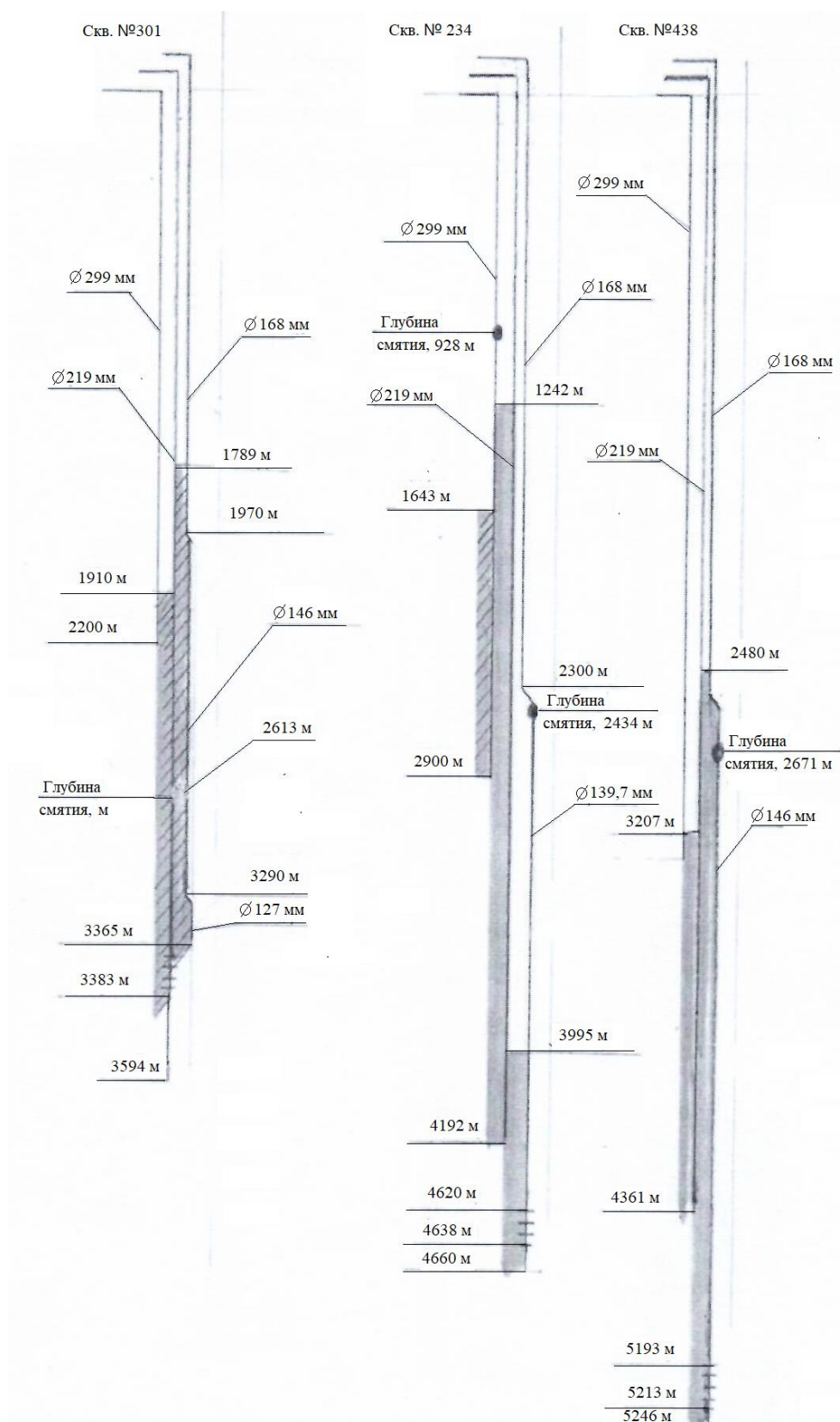


Рис. 2. Конструкция скважин с цементированным забоем № 301, 234, 438

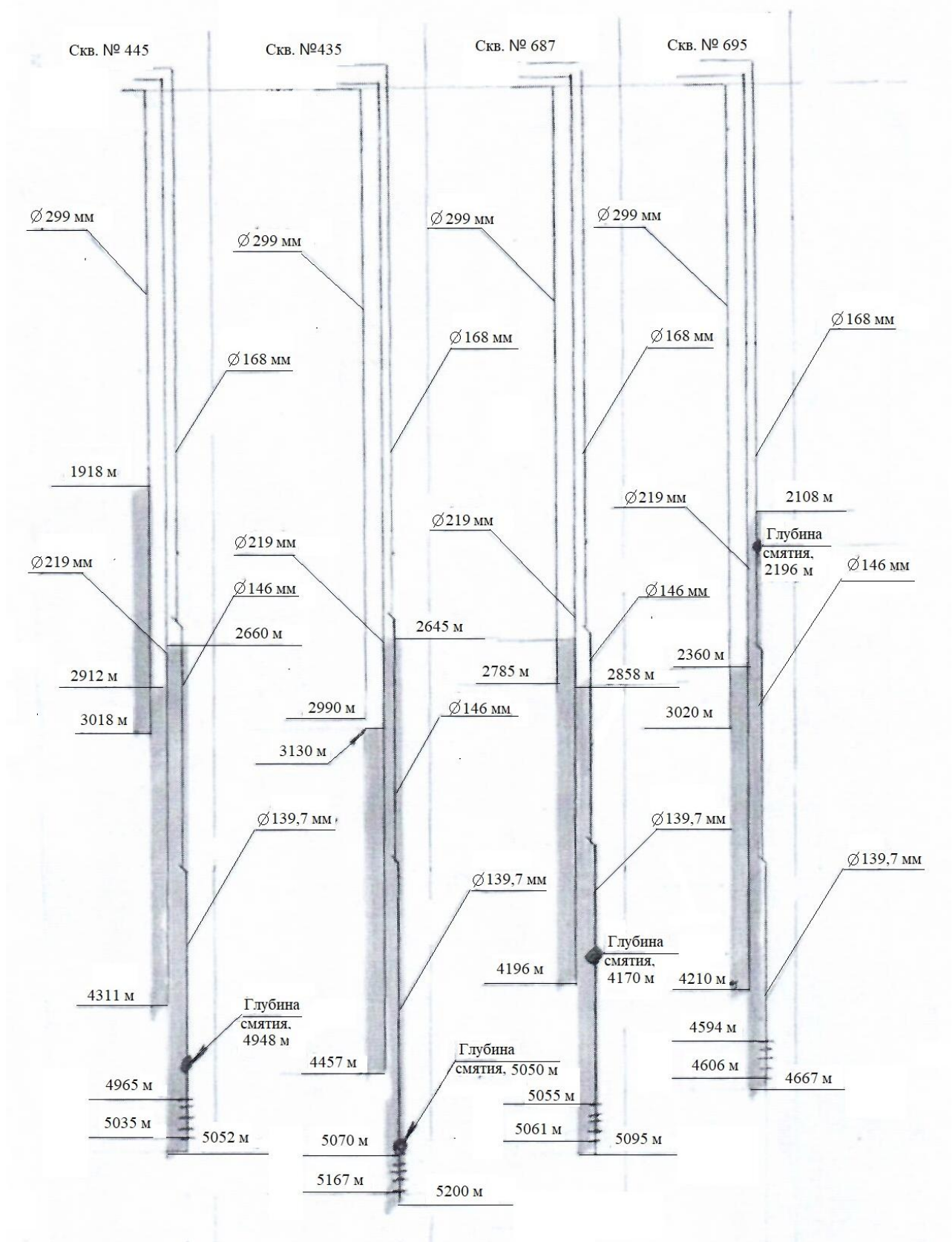


Рис. 3. Конструкция скважин с цементированным забоем № 445, 435, 687, 695

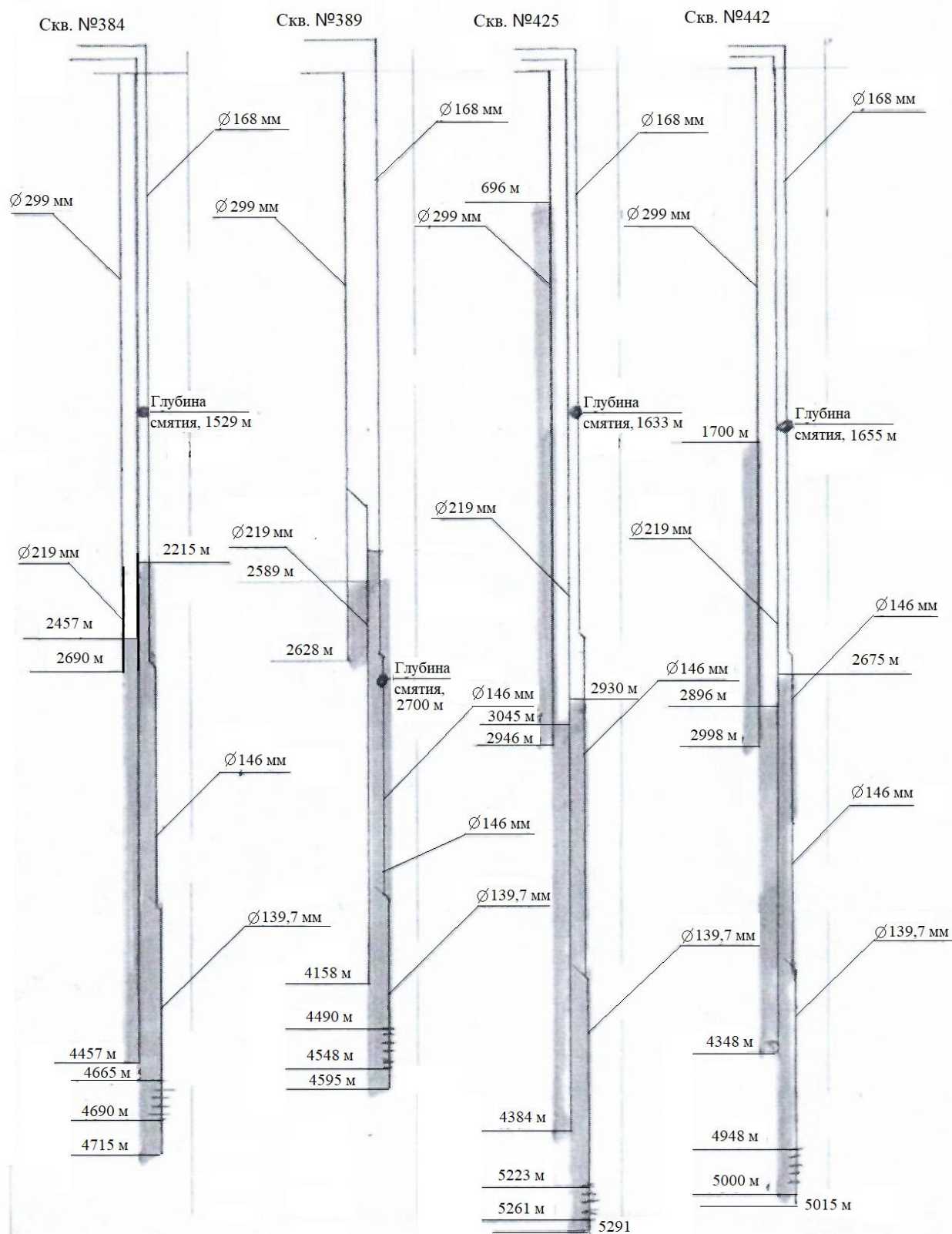


Рис. 4. Конструкция скважин с цементированным забоем № 384, 389, 425, 442

Таблица 2. Данные по скважинам, ликвидированным с освоения по причине смятия эксплуатационной колонны (СМУБР)

№ скв.	Конструкция скважины	Высота подъема цемента, м	Глубина смятия, м	Диаметр марка, и толщина смятой обсадной трубы	Характер пород в интервале смятия	Наличие цементного камня за эксплуатационной колонной	Наличие технической колонны за экс. колонной
301	299-2200 м 219-3594 м 127x146x168- -3395 м	H _ц =0 H _ц =1534 H _ц =1534	2813	146 мм "Л", δ=11 мм	Глины Балаханской Свиты	Экс. колонна зацементирована	219 мм тех. колонна хвостов
234	299-2700 м 219-4192 м 139,7x168- -4660 м	H _ц =1057 H _ц =2950 H _ц =865	2434	139,7 мм обс. труба δ=11 мм	Глины Сабунчинской Свиты	Экс. колонна незацементирована	299 мм тех. колонна
438	299-3021 м 219-4361 м 146x168- -5240 м	H _ц =0 H _ц =1154 H _ц =2760	2671	146 мм "Л", δ=10 мм	Глины Сураханской Свиты	Экс. колонна зацементирована	299 мм тех. колонна
382	299-2340 м 219-3895 м 139,7x146x168- -4350 м	H _ц =1951 H _ц =1650 H _ц =2250	3626	146 мм, "Л" δ=10 мм	Глины Балаханской Свиты	Экс. колонна зацементирована	219 мм хвостовик
451	299-3031 м 219-4312 м 139,7x146x168- -5204 м	H _ц =0 H _ц =1102 H _ц =1660	3271	146 мм труба "Л" δ=10 мм	Глины Сураханской Свиты	Экс. колонна незацементирована	219 мм хвостовик
642	299-3008 м 219-4296 м 139,7x146x168- -5185 м	H _ц =0 H _ц =1500 H _ц =2498	2050	168,3 мм труба "К", δ=11 мм	Глины Сураханской Свиты	Экс. колонна незацементирована	299 мм тех. колонна
630	299-3022 м 219-4350 м 139,7x146x168- -5062 м	H _ц =0 H _ц =1350 H _ц =2790	4860	139,7 мм Р-110, δ=10,56 мм	Глины Балаханской Свиты	Экс. колонна зацементирована	В открытом стволе

Таблица 3. Данные по скважинам, ликвидированным с эксплуатации по причине смятия эксплуатационных колонн (на площади Сангачалы-Дуванний-море-о. Хара-Зиря)

№ скв.	Конструкция скважины	Высота подъема цемента, м	Глубина смятия	Марка смятой обсадной трубы	Характер пород в интервале	Наличие цементного камня за эксплуатационной колонной	Наличие технической колонны за экс. колонной
384	299-2690 м 219-4457 м 139,7x168--145 м	H _ц =0 H _ц =2000 H _ц =2500	1529	168 мм обс	Глины Сураханской свиты	Экс. колонна незацементирована, Т/к 299, зацементирована	299 мм техническая колонна
389	299-2628 м 219-4158 м 139,7x168-4595 м	H _ц =0 H _ц =1569 H _ц =2395	2700	146 мм «Е»	Глины Сураханской свиты	Экс. колонна зацементирована	219 мм хвостовик

окончание таблицы 3

№ скв.	Конструкция скважины	Высота подъема цемента, м	Глубина смятия	Марка смятой обсадной трубы	Характер пород в интервале	Наличие цементного камня за эксплуатационной колонной	Наличие технической колонны за экс. колонной
425	299-2946м 219-4384м 139,7х168- -5291м	H _Ц =2250 H _Ц =1309 H _Ц =2361	2825	168 мм Р – 110 12,06мм	Глины Сураханской свиты	Экс. колонна незацементирована	299 мм, техническая колонна
442	299-2998м 219-4348м 139,7х168- -5015м	H _Ц =1298 H _Ц =1452 H _Ц =2340	1653	168 мм, обсадная труба	Глины Сураханской свиты	Экс. колонна незацементирована	299мм, техническая колонна
445	299-3018м 219-4311м 139,7х168- -5052м	H _Ц =1100 H _Ц =1399 H _Ц =2392	4948	139,7 мм Р – 110 10,54 мм	Глины Балаханской свиты над кровлей VIIгориз.	Экс. колонна зацементирована	В открытом стволе
435	299-2990м 219-4457м 139,7х168- -5200м	H _Ц =0 H _Ц =1327 H _Ц =2555	5050	139,7 мм Р – 110 10,54 мм	Глины Балаханской свиты над кровлей VIIгориз.	Экс. колонна зацементирована	В открытом стволе
687	299-2785м 219-4196м 139,7х168- -5095м	H _Ц =0 H _Ц =1510 H _Ц =2237	4170	139,7 мм Р – 110 10,54 мм	Глины Сабунчинской свиты	Экс. колонна зацементирована	219мм, хвостовик
695	299-3020м 219-4240м 139,7х168- -4677м	H _Ц =0 H _Ц =1280 H _Ц =2559	2196	168 мм, обсадная труба	Глины Сураханской свиты	Экс. колонна зацементирована	299мм, техническая колонна

Новизна работы. Опыт эксплуатации скважин на месторождениях Азербайджана свидетельствует о необходимости изучения несущей способности их эксплуатационных колонн путем проведения исследований механизма взаимодействия в системе К-Ц-П.

Надо отметить, что взаимодействие эксплуатационной колонны с окружающим массивом пород через существующую между ними цементную оболочку представляется теоретически весьма сложной задачей и имеет конкретно направленную полезность. Особенную ценность в теоретической постановке эта задача имеет в том случае, когда практические результаты получаются на базе исследований многослойной модели системы К-Ц-П с различным механическим, физическим и реологическим поведением их материалов. Причем эти исследования должны моделироваться с возможностью проведения оценок показателей работоспособности (прочности, устойчивости и т.д.) и качества (срока службы, остаточного ресурса, определения моделей для резервирования ресурса и т.д.) эксплуатационной колонны в системе К-Ц-П при внешних с различной природой приложения (внутри и снаружи) термомеханических воздействий [8]. Если приложения нагрузок будут соответствовать циклично-повторяющемуся режиму нагружения, то в процессе моделирования свойств материалов системы К-Ц-П необходим также учет деформационной анизотропии. В этом случае цель поставленной задачи может быть

сформулирована (без учета конструктивных особенностей системы) как определение несущей способности и длительности эксплуатации (длительной прочности) эксплуатационной колонны в системе К-Ц-П с учетом свойств материалов и их изменений, режимов нагружения и деформационной анизотропии в свойствах материалов.

Для соответствующего процесса моделирования с целью оценки стадий деформационного процесса необходимо принятие предположения о существовании выпуклой поверхности текучести и проведение анализа ее расположения по отношению к пути нагружения [10, 11]. Путь нагружения является траекторией в пространстве напряжений, определяющей связь между компонентами напряжений. Причем эта связь может допускать как малые деформации, так и конечные деформации (т.е. большие перемещения).

Надо отметить, что удлинение пути нагружения может соответствовать как режиму активного нагружения (способствует возникновению новых дополнительных пластических деформаций), так и режиму разгрузок (приводит к уменьшению деформаций). Кроме того, существует также нейтральное нагружение, когда конец пути нагружения находится на поверхности текучести. В этом процессе пластические деформации остаются неизменными, а упругие деформации меняются. Путь нагружения может быть представлен в пространстве напряжений прямой (простое нагружение) и кривой (сложное нагружение) линиями.

В зависимости от расположения поверхности текучести по отношению к пути нагружения возникают:

- упругие деформации, когда конец пути нагружения находится в пределах поверхности текучести - f_0 (рис. 5);
- пластические (необратимые) деформации, когда конец пути нагружения выходит за пределы начальной поверхности текучести - f_1 (рис. 6). Причем этот процесс развивается мгновенно и не зависит от времени;

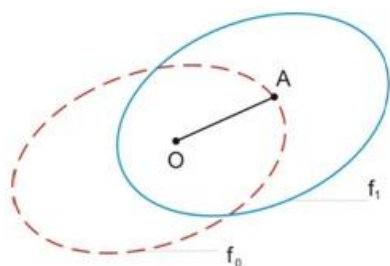


Рис. 5. Обратимые деформации

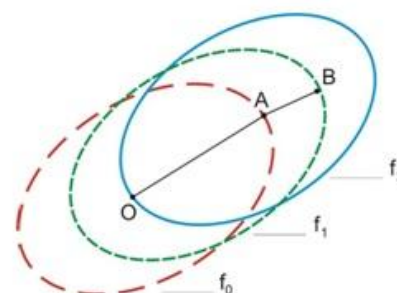


Рис. 6. Необратимые деформации

- деформация ползучести, когда деформация развивается во времени за счет расположения конца пути активного нагружения за пределами поверхности текучести в результате ее сужения с течением времени - f_3 .

В этом процессе путь нагружения не увеличивается.

- деформация вязкости является видом обратимых деформаций, которая развивается и исчезает с течением времени после приложения и снятия внешних воздействий.

Моделирование свойств материалов в зависимости от их реофизических свойств осуществляется на базе нижеприводимых гипотез:

- для упругопластических тел предполагается, что работа суммарной упругой деформации в пространстве напряжений для случая любого статического нагружения в противоположных направлениях является величиной постоянной;

- для ползучих тел предполагается, что работа упругой деформации в пространстве напряжений в случае любого статического нагружения в противоположных направлениях уменьшается на величину работы вязкой деформации.

Вышеописанное позволяет определиться со свойствами и конструктивными характеристиками модели системы К-Ц-Г-П. Следовательно, модель представленной системы для исследования напряженного состояния эксплуатационной колонны характеризуется следующим образом.

Модель – трехслойная цилиндрическая конструкция с различными физико-механическими и реологическими свойствами ее слоев (рис.7):

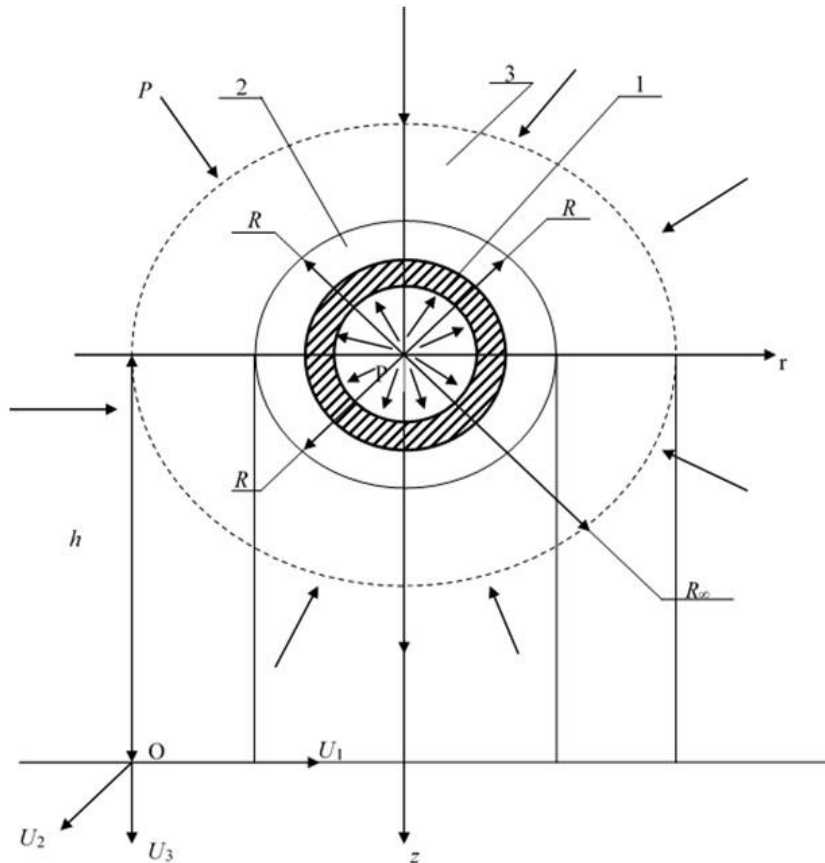


Рис. 7. Модель нагружения эксплуатационной колонны скважины

- эксплуатационная колонна – материал с упругопластическим поведением;
- цемент – с вязкопластическим поведением;
- горный массив – с вязкоупругим поведением.

Трехслойная конструкция в поперечном сечении представляется в виде концентрично расположенных цилиндрических оболочек с соответствующими поперечными сечениями с общим внутренним радиусом – R_0 (рис. 8):

- поперечные размеры внутреннего слоя – $R_1 - R_0$;
- поперечные размеры промежуточного слоя – $R_2 - R_1$;
- поперечные размеры внешнего слоя – $R_\infty - R_2$.

Предполагается, что конструкция нагружена внутренним давлением – P_0 (это может быть давлением транспортной жидкости, давлением подаваемого воздуха и т.д.), а на внешней поверхности действует давление $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -P$ (это может быть давлением горных пород нетронутого массива на глубине – h и т.д.).

Здесь $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, действующие на достаточно отдаленных участках внешнего слоя конструкции.

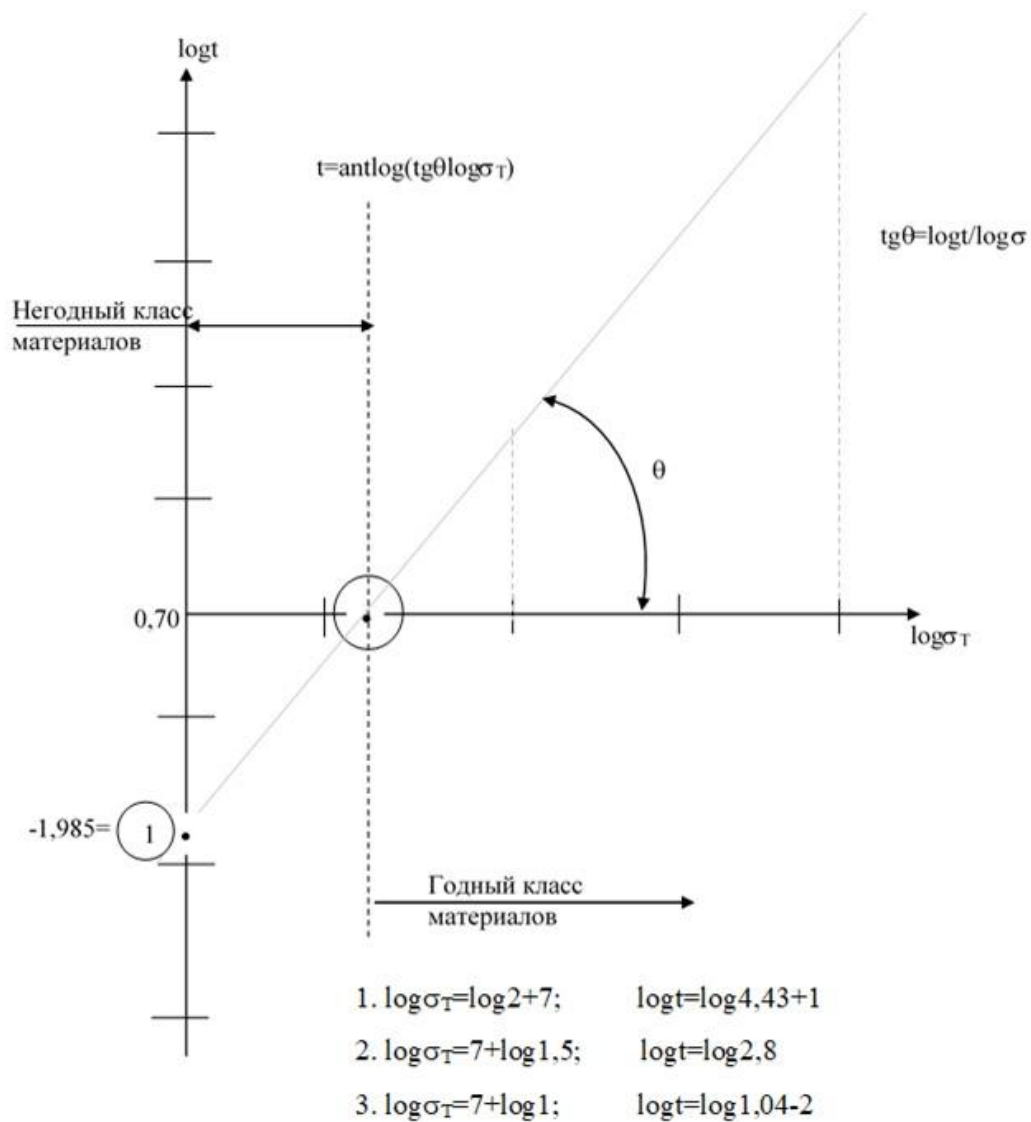


Рис. 8. Определение класса годности материала цементного камня для зоны предполагаемого разрушения

Принимается необходимость выполнения на граничных поверхностях нижеприводимых граничных условий:

$$\begin{aligned}
 \text{при } r = R_0 \quad \sigma_r^K &= -P_0 \\
 \text{при } r = R_0 \quad \sigma_r^K &= \sigma_r^Ц \\
 \text{при } r = R_0 \quad \sigma_r^Ц &= \sigma_r^{\Gamma.П.},
 \end{aligned} \tag{1}$$

а также нижеприводимые условия неразрывности на контактных поверхностях:

$$\begin{aligned}
 U_r^K(R_1) &= U_r^Ц(R_1), \\
 U_r^K(R_2) &= U_r^{\Gamma.П.}(R_2).
 \end{aligned} \tag{2}$$

здесь σ_1 – радиальная составляющая напряжений; К – символ, обозначающий колонну (или внутренний слой); Ц – символ, обозначающий цементную оболочку (или цементно-

промежуточный слой); Г.П. – символ, обозначающий массив горных пород (или внешний слой); U_r – радиальная составляющая вектора перемещений контактных поверхностей.

Решение математической модели для определения срока службы эксплуатационной колонны в системе К-Ц-П. Рассматривается поведение трехслойной конструкции в системе координат, начало координат которой расположено на верхней части оси конструкции, а ось ординат направлена по оси конструкции сверху вниз.

Предполагается, что рассматриваемое сечение находится на глубине $z=h$, и, следовательно, слоистая конструкция находится под действием собственного веса внешнего слоя толщиной – h .

В слоистой цилиндрической конструкции, нагруженной на внутренней и внешней слоях для сечения на глубине « h » (эта глубина определяет нагрузку на внешнем слое), компоненты вектора перемещений представляются функциями:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_1(x_1, x_2); U_2 = U_2(x_1, x_2); U_3 = ax_3 + b, \\ U_1 &= U_r; U_2 = U_\varphi; U_3 = U_z, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_1 = r \cos \varphi$; $x_2 = r \sin \varphi$.

Примечание: из (3) следует, что в плоскости, перпендикулярной оси « Z », перемещения не являются функциями этой координаты, а третья компонента перемещения представлена в виде линейной зависимости от координаты « Z », и, следовательно, коэффициенты этой функции $a = \text{const}$, $b = \text{const}$. С учетом принятой модели деформирования и соответствующих обозначений для перемещений:

$$\begin{aligned} \ell_{11} &= \frac{\partial U_1}{\partial x_1}; & \ell_{22} &= \frac{\partial U_2}{\partial x_2}; \\ \ell_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} + \frac{\partial U_2}{\partial x_1} \right); & & \\ \ell_{23} &= 0; & \ell_{31} &= 0; & \ell_{33} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Рассматривается квазиплоское деформированное состояние, для которого в упругой области с учетом выражений для компонент вектора перемещений, тензора деформаций и закона Гука, связывающего эти деформации с напряжениями:

$$\begin{aligned} \ell_{11} &= \frac{1+\nu}{E} [\sigma_{11} - \nu(\sigma_{11} - \sigma_{22})] + a; \\ \ell_{22} &= \frac{1+\nu}{E} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} - \sigma_{22})] + a; \\ \ell_{12} &= \frac{1+\nu}{E} \sigma_{12}. \end{aligned} \quad (5)$$

На основе условия совместности деформаций определяется выражение в виде дифференциального уравнения в частных производных, связывающее компоненты тензора деформаций и напряжений, из дифференциального уравнения равновесия для случая отсутствия массовых сил:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \ell_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \ell_{22}}{\partial x_1^2} &= 2 \frac{\partial^2 \ell_{12}}{\partial x_1 \partial x_2}; \\ \frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial x_2^2} &= -2 \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial x_1 \partial x_2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Известно, что уравнение Леви, полученное на основе предположений:

- рассматриваются малые деформации, т.е. не учитывается геометрическая нелинейность;
- принимается плоский характер деформаций;

- в уравнениях равновесия массовые силы не учитываются - действительно имеет место плоско-деформированное состояние. Однако зависимости, приводимые в (5) и (6), подтверждают их правомерность и применимость для квазиплоского состояния, так как приводят к уравнению

$$\Delta(\sigma_{11} + \sigma_{22}) = 0,$$

где Δ – оператор Лапласа.

Или, если ввести функцию напряжений Эри, то для плоского деформированного состояния

$$\Delta\Phi(x_1, x_2) = 0,$$

здесь $\Phi(x_1, x_2)$ – функция напряжений Эри.

При отсутствии массовых сил напряженное состояние упругого тела в любом его сечении, перпендикулярном оси X_3 , для случая квазиплоской деформации не зависит от механических свойств материала и определяется заданными на контуре этого сечения силами и его формой.

Эта теорема легко доказывается для среды с начальным напряженным состоянием. При этом во всех формулах компоненты тензора напряжений σ_{ij} заменяются компонентами $\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0$. Здесь σ_{ij}^0 – компоненты начального напряженного состояния.

Теорема доказана для: упругопластических тел, вязкопластических тел, вязкоупругих тел с начальным напряженным состоянием.

С учетом правомерности теоремы Мориса-Леви для тел с различным реологическим поведением для каждого слоя исследуемой трехслойной конструкции решение задачи о напряженном состоянии могут быть представлены результатами решения задачи Ляме.

Для колонны, т.е. внутреннего слоя исследуемой системы для упругого поведения

$$\begin{aligned}\sigma_r^K &= \frac{R_0^2 R_1^2 (P_1 - P_0)}{R_1^2 - R_0^2} \frac{1}{r^2} + \frac{R_0^2 P_0 - R_1^2 P_1}{R_0^1 - R_0^2}; \\ \sigma_\phi^K &= -\frac{R_0^2 R_1^2 (P_1 - P_0)}{R_1^2 - R_0^2} \frac{1}{r^2} + \frac{R_0^2 P_0 - R_1^2 P_1}{R_0^1 - R_0^2}; \\ U_r^K &= \frac{1 + \nu_K}{E_K (R_1^2 - R_0^2)} \left[R_0^2 R_1^2 (P_0 - P_1) \frac{1}{r} + (1 - 2\nu_K)(R_0^2 P_0 - R_1^2 P_1)r \right];\end{aligned}\quad (7)$$

Здесь $P_1 = \sigma_r^K(R_1) = \sigma_r^H(R_1)$; E_K, ν_K – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала внутреннего слоя.

Для цемента, т.е. срединного слоя с упругими характеристиками

$$\begin{aligned}\sigma_r^H &= \frac{R_1^2 R_2^2 (P_2 - P_1)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r^2} + \frac{R_1^2 P_1 - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2}; \\ \sigma_\phi^H &= -\frac{R_1^2 R_2^2 (P_2 - P_1)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r^2} + \frac{R_1^2 P_1 - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2}; \\ U_r^H &= \frac{1 + \nu_H}{E_H (R_2^2 - R_1^2)} \left[R_1^2 R_2^2 (P_1 - P_2) \frac{1}{r} + (1 - 2\nu_H)(R_1^2 P_1 - R_2^2 P_2)r \right].\end{aligned}\quad (8)$$

Здесь E_H, ν_H – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала срединного слоя.

Для горной породы, т.е. внешнего слоя исследуемой системы

$$\sigma_r^{r.п.} = A \frac{1}{r^2} + B(1 + 2 \ln r) + 2c;$$

$$\sigma_{\Pi}^{\Gamma.\Pi} = -A \frac{1}{r^2} + B(1 + 2 \ln r) + 2c, \quad (9)$$

здесь A, B, C – постоянные интегрирования, определяемые по граничным условиям при $r=R_2$

$$\begin{aligned} \sigma_r^{\Gamma.\Pi} &= -P_2; \\ r \rightarrow \infty \quad \sigma_r^{\Gamma.\Pi} &= -P_\infty, \end{aligned}$$

с учетом которых

$$\begin{aligned} \sigma_r^{\Gamma.\Pi} &= R_2^2 (P_\infty - P_2) \frac{1}{r^2} - P_\infty; \\ \sigma_\phi^{\Gamma.\Pi} &= -R_2^2 (P_\infty - P_2) \frac{1}{r^2} - P_\infty; \\ U_r^{\Gamma.\Pi} &= \frac{1 + \nu_{\Gamma.\Pi}}{E_{\Gamma.\Pi}} \left[-R_2^2 (P_\infty - P_2) \frac{1}{r} - P_\infty (1 - 2\nu_{\Gamma.\Pi}) r \right]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$P_2 = \sigma_r^{\Pi}(R_2) = \sigma_r^{\Gamma.\Pi}(R_2);$$

$E_{\Gamma.\Pi}, \nu_{\Gamma.\Pi}$ – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала внешнего слоя.

Далее определяются значения усилий, возникающих на контактных поверхностях между 1 и 2, 2 и 3 слоями.

Для этого используются условия неразрывности деформаций (6) и выражения 8-10 для перемещений на контактных поверхностях. После несложных преобразований получены нижеприводимые зависимости для определения усилий, возникающих на контактных поверхностях слоев :

$$P_1 = \frac{\Delta_0}{\Delta}; P_2 = \frac{\Delta_\infty}{\Delta}. \quad (11)$$

Здесь:

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} A_{11} - A_{12} \\ A_{21} - A_{22} \end{vmatrix}; \quad \Delta_0 = \begin{vmatrix} A_{10} P_0 - A_{12} \\ -A_2 P_0 - A_{22} \end{vmatrix}; \quad \Delta_\infty = \begin{vmatrix} A_{11} - A_{10} P_0 \\ A_{21} - A_{20} P_\infty \end{vmatrix} \\ A_{11} &= A_K R_1 \left[(R_0^2 - R_1^2)(1 - \nu_K) \right] + A_{\Pi} R_1 \left[R_2^2 - R_1^2 (1 - \nu_{\Pi}) \right]; \\ A_{12} &= 2A_{\Pi} R_1 R_2^2 (1 - \nu_{\Pi}); \quad A_{10} = 2A_K R_0^2 R_1 (1 - \nu_K); \quad A_{21} = 2A_{\Pi} R_1^2 R_2 (1 - \nu_{\Pi}) \\ A_{22} &= A_{\Pi} R_2 \left[R_1^2 - R_2^2 (1 - \nu_{\Pi}) + A_{\Gamma.\Pi} R_2 \right]; \quad A_{20} = 2A_{\Gamma.\Pi} R_2 (1 - \nu_{\Gamma.\Pi}) P_\infty; \\ A_K &= \frac{1 + \nu_K}{E_K (R_1^2 - R_0^2)}; \quad A_{\Pi} = \frac{1 + \nu_{\Pi}}{E_{\Pi} (R_2^2 - R_1^2)}; \quad A_{\Gamma.\Pi} = \frac{1 + \nu_{\Gamma.\Pi}}{E_{\Gamma.\Pi}}. \end{aligned}$$

С этой целью использовано условие разрушения для вязкоупругих тел в виде

$$J_1^2 + 2(1 + \nu) J_2 = 2\sigma_T^2 - 2E \sigma_{ij} \ell_{ij}^\vee, \quad (12)$$

здесь $J_1 = \sigma_{ij} g_{ij}, J_2$ – первый и второй инварианты тензора напряжений; σ_T – предел текучести; а также существующие связи между компонентами деформации и напряжений при деформации ползучести

$$\ell_{ij} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} J_1 g_{ij} + \frac{1}{E} \int_0^t A(t + \tau) [(1 + \nu) \sigma_{ij} - \nu J_1 g_{ij}] d\tau;$$

ℓ_{ij}^\vee – вязкие составляющие компонент деформаций, т.е.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{E} \int_0^t H(t, \tau) [(1 + \nu)\sigma_{ij} - \nu J_1 g_{ij}] d\tau$$

Для постоянных напряжений компоненты вязкой деформации представляются как

$$\begin{aligned} \epsilon_{ij}^v &= \frac{h(t)}{E} [(1 + \nu)\sigma_{ij} - \nu J_1 g_{ij}]; \\ h(t) &= \int_0^t H(t, \tau) d\tau, \end{aligned} \quad (13)$$

где $H(t, \tau)$ – ядро ползучести, а соответствующее условие прочности в виде зависимости

$$J_1^2 + 2(1 + \nu)J_2 = 2\sigma_T^2 - 2h(t)[(1 + \nu)\sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij} - \nu J_1^2].$$

Определяется функция $h(t)$, являющаяся интегральной функцией ядра ползучести $H(t, \tau)$. Для этого принимается во внимание выражение

$$\sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij} = 2J_2 + J_1^2,$$

на основании которого в результате определяются функция $h(t)$ в явном виде нижеприводимой зависимостью:

$$h(t) = \frac{2\sigma_T^2 - J_1^2 - 2(1 + \nu)J_2}{2[J_1^2 + 2(1 + \nu)J_2]}.$$

Выбирается ядро ползучести для вязкоупругого тела (например, грунта и т.д.) в виде [10]

$$H(t - \tau) = \delta(t - \tau)^{-\alpha}.$$

В этом случае функция $h(t)$ равна

$$h(t) = \frac{\delta}{1 - \alpha} t^{1 - \alpha} \quad (14)$$

$\alpha \approx 0,729$; $\delta = 0,0021 \text{ сек}^{-1}$.

Определяется время t наступления разрушения поверхности взаимодействия первого и второго слоев, т.е. на внутренней поверхности второго слоя, подставив (14) в (13):

$$t^{1 - \alpha} = \frac{1 - \alpha}{\delta} \cdot \frac{2\sigma_T^2 - J_1^2 - 2(1 + \nu)J_2}{2[J_1^2 + 2(1 + \nu)J_2]}. \quad (15)$$

Правая часть выражения (15) зависит от первого и второго инвариантов тензора напряжений, компоненты которого определяются уравнениями (8):

$$\sigma_r^{\text{II}} = m \frac{1}{r^2} + n; \quad \sigma_\phi^{\text{II}} = -m \frac{1}{r^2} + n.$$

Здесь

$$m = \frac{R_1^2 R_2^2 (P_2 - P_1)}{R_2^2 - R_1^2}; \quad n = \frac{R_1^2 P_1 - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2}.$$

Количественная интерпретация полученных результатов.

Предполагаются заданными:

- расположение зоны повреждения от поверхности земли – $H = 2000 \text{ м}$;
- удельный вес промывочной жидкости, находящейся внутри внутреннего слоя (может быть поток воздуха, подаваемый в скважину) – $\gamma = 1.6 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$;
- удельный вес внешнего слоя – $\gamma_1 = 2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$;
- модуль упругости материала внешнего слоя – $E_{\Gamma, \text{II}} = 2 \cdot 10^{10} \text{ МПа}$;
- модуль упругости материала срединного слоя (цементного камня) – $E_{\text{II}} = 1.8 \cdot 10^{10} \text{ МПа}$;
- коэффициент Пуассона материала срединного слоя (цементного камня) – $\nu = 0,4$.

- геометрические параметры расчетного многослойного тела принимаются равными

$$R_0 = 0,1 \text{ м}; R_1 = 0,11 \text{ м}; R_2 = 0,35 \text{ м}.$$

Расчетные показатели:

$$\begin{aligned} & - P_0 = 40 \text{ МПа} \quad - P_\infty = 40 \text{ МПа} \\ A_K &= 3,1 \cdot 10^{-9} \text{ 1/Н} \quad A_{II} = 1,057 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Н} \quad A_{III} = 7,0 \cdot 10^{-11} \text{ 1/Н} \\ A_{11} &= 1,3 \cdot 10^{-9} \quad A_{12} = 2,64 \cdot 10^{-9} \quad A_{10} = 0,477 \cdot 10^{-11} \\ A_{21} &= 1,76 \cdot 10^{-9} \quad A_{22} = 15,25 \cdot 10^{-11} \quad A_{20} = 1,134 \cdot 10^{-11} \\ \Delta &= 44481,5 \cdot 10^{-22} \quad \Delta_0 = 1226,6 \cdot 10^{-15} \quad \Delta_\infty = 952,7 \cdot 10^{-15} \\ P_1 &= 2,76 \cdot 10^5 \quad P_2 = 2,15 \cdot 10^5 \end{aligned}$$

Рассчитываются для $r=R_1$ напряжения и инварианты тензора напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -2,76 \cdot 10^5; \quad \sigma_\varphi = -0,88 \cdot 10^5; \quad \sigma_z = -4 \cdot 10^7; \\ J_1 &= -3,98 \cdot 10^7; \quad J_1^2 = 1,58 \cdot 10^{14}; \quad J_2 = -7,5 \cdot 10^{12}; \\ J_1^2 &+ 1(1 + \nu)J_2 = 1,37 \cdot 10^{14}. \end{aligned}$$

Определяется время t наступления разрушения.

1. Для $\sigma_T = 2 \cdot 10^7$ МПа $t \cong 4,43$ год
2. Для $\sigma_T = 1 \cdot 10^7$ МПа $t \cong 3$ сутки
3. Для $\sigma_T = 1,5 \cdot 10^7$ МПа $t \cong 2,8$ год

Выводы

1. В результате анализа промыслово-статистического материала по смятиям эксплуатационных колонн установлено, что их причинами, в основном, являются нарушение технологических режимов освоения и эксплуатации скважин, низкое качество цементирования колонн, несоответствие рецептуры цементного камня требуемым его реофизическим и механическим характеристикам, наличие заколонных слоев вязкопластичных пород с ярко выраженными характеристиками ползучести.

2. Разработана и рекомендована для практического использования методика для оценки параметров ядра ползучести различных в сочетаниях деформационных свойств слоистых конструкциях цилиндрической формы типа Т-ЦК-П при их внешнем и внутреннем нагружениях.

3. Установлено, что время « t » наступления разрушения в срединном слое – цементном камне конструкции может быть определено в зависимости от первого и второго инвариантов тензора напряжений в конструкции и режимов ее нагружения.

4. Определено пороговое значение предела текучести материала срединного слоя трехслойной конструкции, классифицирующее ее приемлемость по прочностным свойствам;

5. Определен класс пригодных и непригодных материалов для цементного камня по пороговому значению предела ее текучести, имеющих конкретное конструктивное исполнение и установленный режим нагружения. Установлено, что двукратное увеличение предела текучести цементного камня на более чем порядок увеличивает срок службы колонны в конструкциях типа Т-ЦК-П.

6. Выведена система трансцендентных уравнений для определения несущей способности цементного камня в конструкции Т-ЦК-П. Получена и рекомендована для практических расчетов зависимость для определения минимальной толщины цементного камня. Установлено, что при заданных внешних нагрузках в конструкции Т-ЦК-П наибольшая несущая способность цементного камня может быть обеспечена при увеличении ее толщины до $d = 0,4 + 0,5$.

Наведено аналіз промыслово-статистичного матеріалу за зм'яттями експлуатаційних колон, на основі якого встановлено, що їх причинами, в основному, є порушення технологічних режимів освоєння та експлуатації свердловин, низька якість цементування колон, невідповідність рецептури цементного каменю до необхідних його реофізичних і механічних характеристик, наявність

заколонних шарів в'язко-пластичних порід з яскраво вираженими характеристиками повзучості. Визначено порогове значення границі текучості матеріалу серединного шару тришарової конструкції, що класифікує її прийнятність за міцнісними властивостями. Визначено клас придатних і непридатних матеріалів для цементного каменю за пороговим значенням границі їх текучості, що мають конкретне конструктивне виконання і встановлений режим навантаження. Отримано рівняння для визначення несучої здатності цементного каменю в конструкції Т-ЦК-П з урахуванням її метричних характеристик.

Ключові слова: тришарова конструкція, механічна характеристика, порогове значення, придатний і непридатний клас, несуча здатність, сумісність, метрична характеристика.

**R. A. Hasanov¹, Sh. Kh. Bekirov², A. R. Hasanov³, A. I. Zeinalov⁴, C. R. Gasimova¹, T. A. Aslanov²,
Sh. S. Musayev⁵**

¹Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku

²Socarupstream management international LLC, Baku, Azerbaijan

³Trest Complex drilling operations of SOCAR, Baku, Azerbaijan

⁴JVC Shallow water of Absheron, Baku, Azerbaijan

⁵Science and Technology University, Norway

ANALYSIS OF THE MECHANISM OF THE INTERACTION OF OPERATIONAL COLUMNS WITH THE ENVIRONMENT OF BREEDS AND DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE OF THEIR DESIGN

The analysis of statistical and operational data leads to the fact that they are based on problems associated with changes in the operating conditions and operation of wells, as well as inconsistency of the cement stone recipe and its reophysical and mechanical effects, the presence of viscous-plastic rocks behind the column layers with pronounced creep indicated. The threshold value of the yield strength of the material of the middle layer of a three-layer structure has been determined, which classifies its acceptability by strength properties. The class of suitable and unsuitable materials for a cement stone is determined by the threshold value of its yield strength, having a specific design and a set loading mode. An equation is obtained for determining the bearing capacity of a cement stone in the T – TsK – P structure with regard to its metric characteristics.

Key words: three-layer construction, mechanical characteristic, horn value, suitable and unsuitable class, bearing capacity, compatibility, metric characteristic.

Литература

1. Гузь А.Н. Основы теории устойчивости горных выработок. / Гузь А.Н. – Киев: Наукова думка, 1977. – 204 с.
2. Измайлов Л.Б. Установка для исследования сопротивляемости смятию колец под воздействием внешнего давления: учеб. пос. / Л.Б.Измайлов, А.А.Нежелский, А.В.Павельчак. – Краснодар: Краснодарское книжное изд-во, 1973. – С.120-123.
3. Карманов И.А. Исследование температурных режимов в бурящихся скважинах при циркуляции промывочной жидкости. / Карманов И.А. – Баку: Нефтяное хозяйство, 1963, №12. – С.18-21.
4. Мухин Л.К. Физико-химическая модель приствольной части скважины, пробуренной в неустойчивых отложениях. / Мухин Л.К., Соловьев В.Н., Табученко В.Н. – НТС: Бурение. – 1980, №6 – С. 37-38.
5. Рабинович Н.Р. Определение времени устойчивого состояния приствольной зоны скважины. / Рабинович Н.Р., Воротнюк О.В. и др. – Баку: Нефтяное хозяйство, 1977, №8 – С.23-24.
6. Ягубов Н.И. Расчет обсадных колонн на прочность. – М.: Недра, 1982. – 184с.
7. Гасанов Р.А. Исследование причин нарушения обсадных колонн и разработка мероприятий по их устранению:автореф.дис. на соискание уч. степени

- канд.тех.наук:3313 «Машины, оборудования и процессы» / Р.А.Гасанов Р.А. – Баку,1981. – 15 с.
8. Тимофеев Н.С. Усталостная прочность стенок скважин. /Тимофеев Н.С., Вугин Р.Б., Яремейчук Р.С. – М.: Недра, 1972. – 200 с.
 9. Гульгазли А.С. Некоторые вопросы пластичности упрочняющихся материалов: учеб. пос. / А.С.Гульгазли. – Баку: Элм, 1988. –С.111-115.
 10. Муфидзаде В.Н. Исследование эрозийного воздействия бурового раствора на стенки скважин. / Муфидзаде В.Н. – Баку: Нефтяное хозяйство, 1981, №10 – С. 44-47.
 11. Сеид-Рза М.К. Предупреждение осложнений в кинетике буровых процессов. / Сеид-Рза М.К., Фараджев Т.Г., Гасанов Р.А. – М.: Недра, 1991. – 271 с.

Поступила 04.07.2019

References

1. Guz, A. N. (1977). *Osnovy teorii ustoichivosti gornykh vyrabotok [Basic theory of sustainability in mining]*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
2. Izmaylov, L. B., Nedzelskiy, A. A., Pavelchak, A. V. (1973). *Ustanovka dlia issledovaniia soprotivliaemosti smiatiiu kolets pod vozdeistviem vneshnego davleniia [Installation for the study of resistance to crushing of the rings under the influence of external pressure]*. Krasnodar: Krasnodarskoe knizhnoe izdatelstvo [in Russian].
3. Karmanov, I. A. (1963). *Issledovanie temperaturnykh rezhimov v buriashchih skvazhinakh pri tsirkuliacii promyvochnoi zhidkosti [Study of temperature regimes in drilled wells during circulation of washing fluid]*. Baku: Neftianoe khoziaistvo [in Russian].
4. Mukhin, L. K., Solovyev, V.N., Tabuchenko, V.N. (1980). *Fiziko-khimicheskaia model pristvolnoi chasti skvazhiny, proburennoi v neustoichivykh otlozheniiakh [Physical and chemical model of the near-wellbore part of a well drilled in unstable sediments]*. NTS: Bureniye [in Russian].
5. Rabinovich, N. R., Vorotnyuk, O. V. et al. (1977). *Opredelenie vremeni ustoichivogo sostoyaniia pristvolnoi zony skvazhiny [Determination of the time of steady state of the wellbore zone]*. Baku: Neftianoe khoziaistvo [in Russian].
6. Yagubov, N. I. (1982). *Raschet obsadnykh kolonn na prochnost [Account casing columns]*. Moscow: Nedra [in Russian].
7. Gasanov, R. A. (1981). *Issledovanie prichin narusheniia obsadnykh kolonn i razrabotka meropriiatii po ikh ustraneniuiu [Study of the causes of casing strings and the development of measures to eliminate them]*. Extended abstract of candidate's thesis. – Baku [in Russian].
8. Timofeyev, N. S., Vugin, R. B., Yaremeychuk, R. S. (1972). *Ustalostnaia prochnost stенок skvazhin [Well wall fatigue strength]*. Moscow: Nedra [in Russian].
9. Gulgazli, A. C. (1988). *Nekotorye voprosy plastichnosti uprochniaiushchikhsia materialov [Some issues of plasticity hardening materials]*. Baku: Elm [in Russian].
10. Mufidzadeh, V.N. (1981). *Issledovanie eroziinogo vozdeistviia burovogo rastvora na stenki skvazhin [Study of the erosive effect of drilling fluid on the walls of wells]*. Baku: *Neftianoe khoziaistvo – Oil industry, 10* [in Russian].
11. Seid-Rza, M. K., Faradzhev, T. G., Gasanov, R. A. *Preduprezhdenie oslozhnenii v kinetike burovyykh protsessov [Prevention of complication in kinetics of drilling processes]*. Moscow: Nedra [in Russian].