

Селюков Е.И.,
кандидат геолого-минералогических наук,
ОАО «Фундаментпроект»

Особенности влияния геологической среды на устойчивость магистральных трубопроводных систем

Надежность и безопасность трубопроводного транспорта является одной из важнейших задач в нефтегазовой промышленности [6,15] При этом основным негативом считаются движения по разрывным нарушениям, которые в большом количестве пересекают магистральные нефтегазопроводы. Величина вертикальных движений земной поверхности в этих структурах носит возвратно-поступательный характер с годовым периодом и составляет 10-30 мм. Как видно, и длина периода, и величина амплитуды не в состоянии нарушить целостность труб. В сейсмоактивных районах при землетрясении движения земной поверхности могут достигать нескольких десятков см и даже первых метров. Но сильные землетрясения случаются крайне редко, а деформации трубопроводов происходят с периодичностью 2-3 года. Наиболее приемлимым объяснением этого процесса являются так называемые суперактивные деформации земной поверхности в зонах разломов [4]. Эти аномальные движения высокоамплитудны (50-70) мм/год, короткопериодичны (от 0,1 года до 1 года), пространственно локализованы (0,1-1 км), обладают пульсационной и знакопеременной направленностью. По данным авторов [4] современные суперактивные деформации разломных зон-это параметрически индуцированные (малыми воздействиями) тектонические деформации геологической среды. Известно, что геологическая среда находится под влиянием квазистатических (глобальное и региональное поле напряжений) и динамических (приливы, неравномерное вращение Земли, процессы подготовки землетрясений, сейсмические волны, техногенное воздействие) нагрузок. При этом в разломных зонах постоянно присутствует и перераспределяется динамически активная и химически агрессивная флюидная система. Взаимодействие всех этих факторов в пределах зон разломов в результате кратковременных флуктуаций прочностных характеристик горных пород приводит к возникновению суперинтенсивных деформаций тектонических зон, в которых малые воздействия приводят к аномально большим(до 2-3 порядков) откликам среды на эти воздействия.

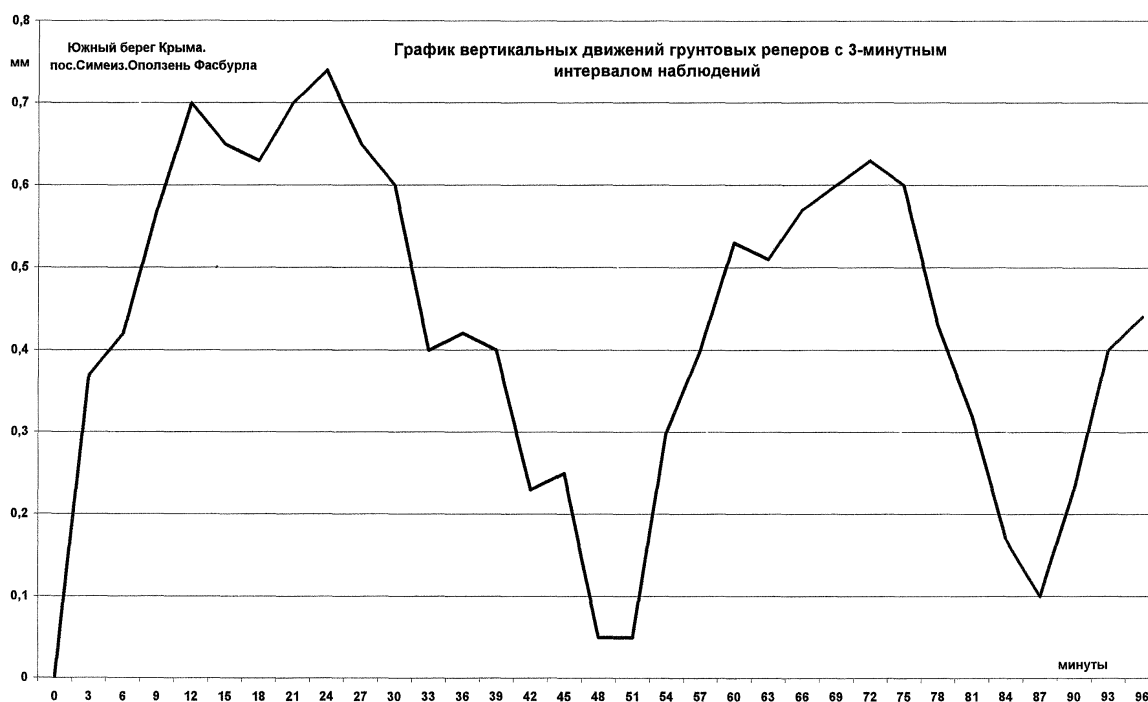


Рис.1. График вертикальных движений грунтовых реперов с 3-х минутным интервалом наблюдений.[7]

Частотные характеристики колебаний смещений и деформаций имеют широкий спектр, но четко выделяются гармоники с продолжительностью периодов в пределах 30-60 минут[9] На рис.1 приведены результаты вертикальных движений грунтового репера с трехминутным интервалом наблюдений (Южный берег Крыма), подтверждающие наличие 60-минутной гармоники. Приведенные 60-минутные гармоники связаны с неравномерностью вращения Земли, о чем указывается в работе [7]. Ранее в работе [12,13] приводились экспериментальные данные о влиянии ротационного поля напряжений на инженерные сооружения. Динамическая система геоида, являясь источником энергии геологических процессов, передачу (перенос) этой энергии осуществляет колебаниями, которые подчиняются законам волновой механики [2,14,16]. Предполагается, что собственные колебания Земли порождают единую систему стоячих волн, каждая из которых готова к резонансу. Система общеземных стоячих волн и формируемые на их основе гармоники создают упорядоченные интерференционные решетки (волны сжатия-растяжения), на базе которых возникли геодинамические и тектонические структуры в прошлом. В настоящую геологическую эпоху на базе интерференционных решеток образуются так называемые геодинамические зоны (по Ю.С. Рябоштану, 1986) или отпечатки ротационного поля напряжений (по А.В. Долицкому, 1986). Совокупность

геодинамических зон различного иерархического уровня образует геодинамическую структуру горного массива.

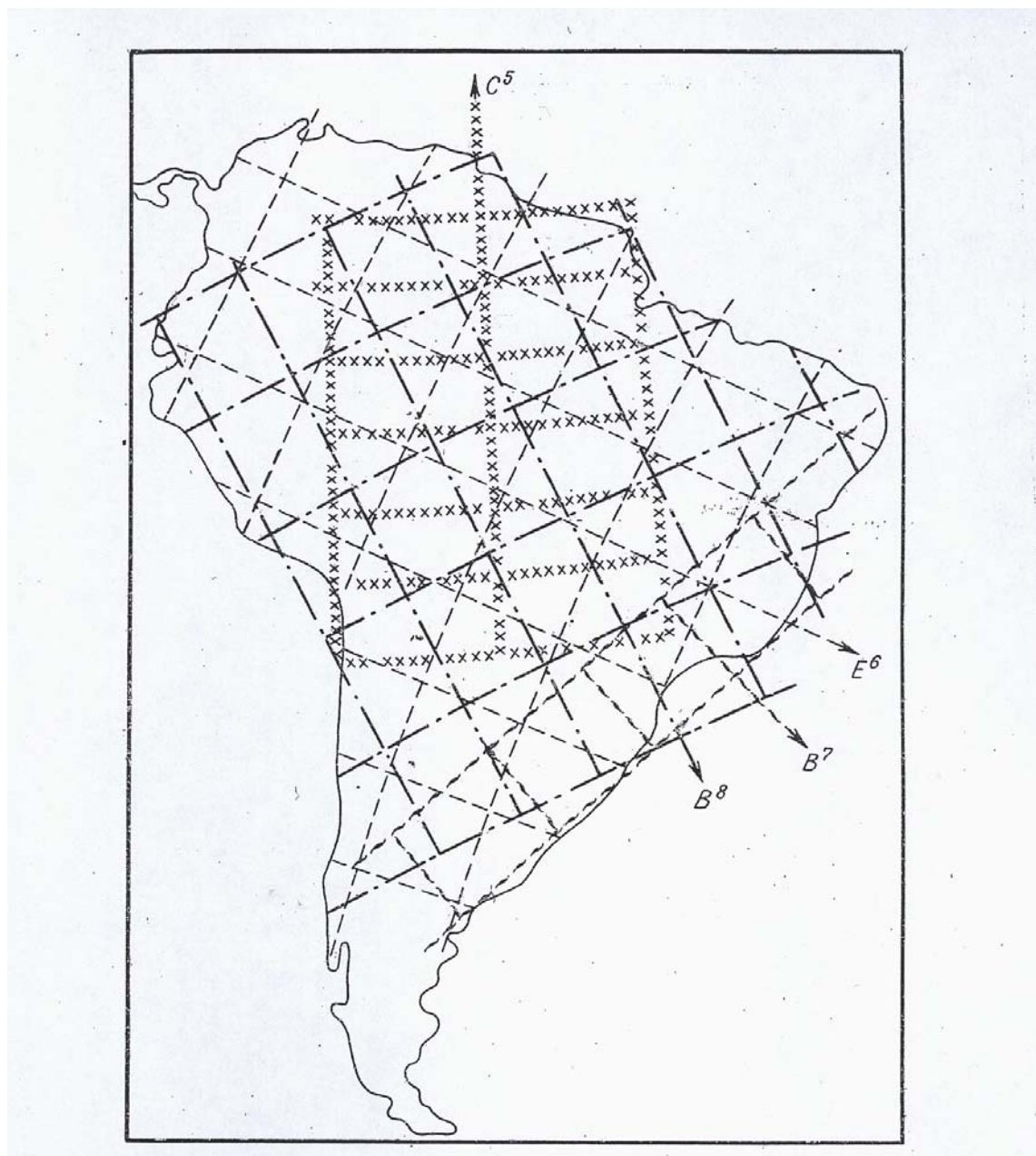


Рис.2

На рис.2 показан отпечаток глобального ротационного поля напряжений на территории Южной Америки [5]. Отпечаток C^5 распространен по всей площади материка, отвечая широтным и меридиональным направлениям современного глобального поля напряжений.

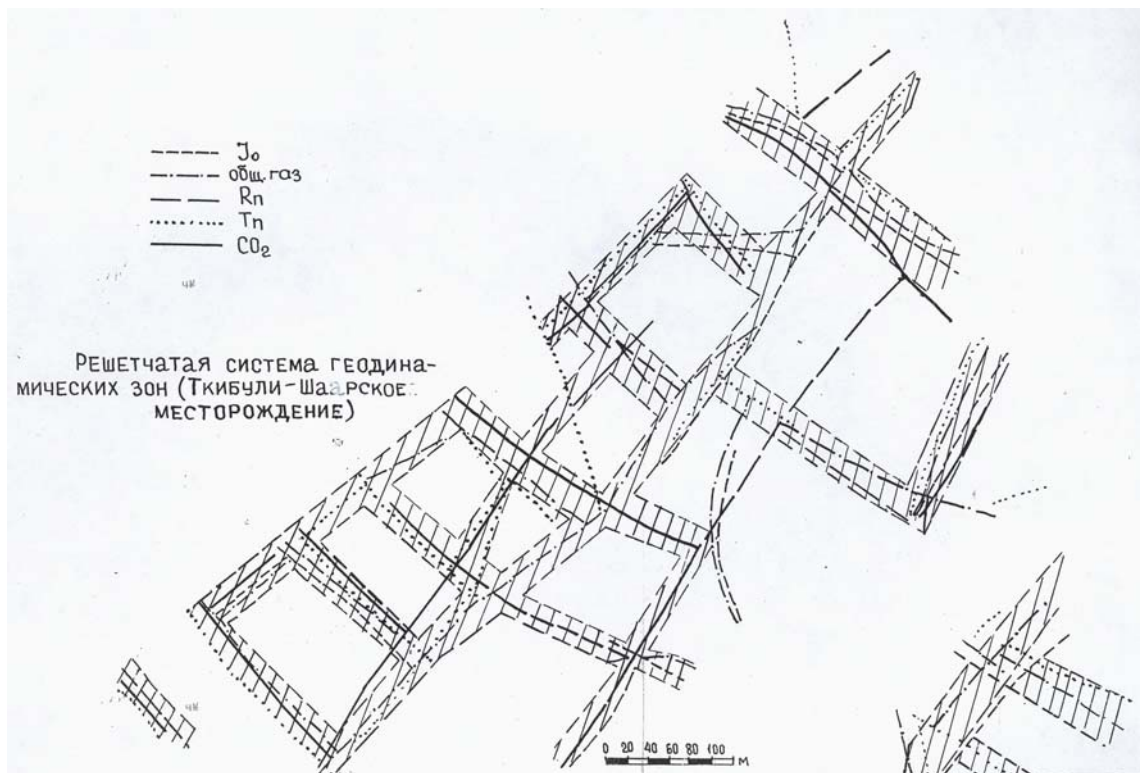


Рис.3.

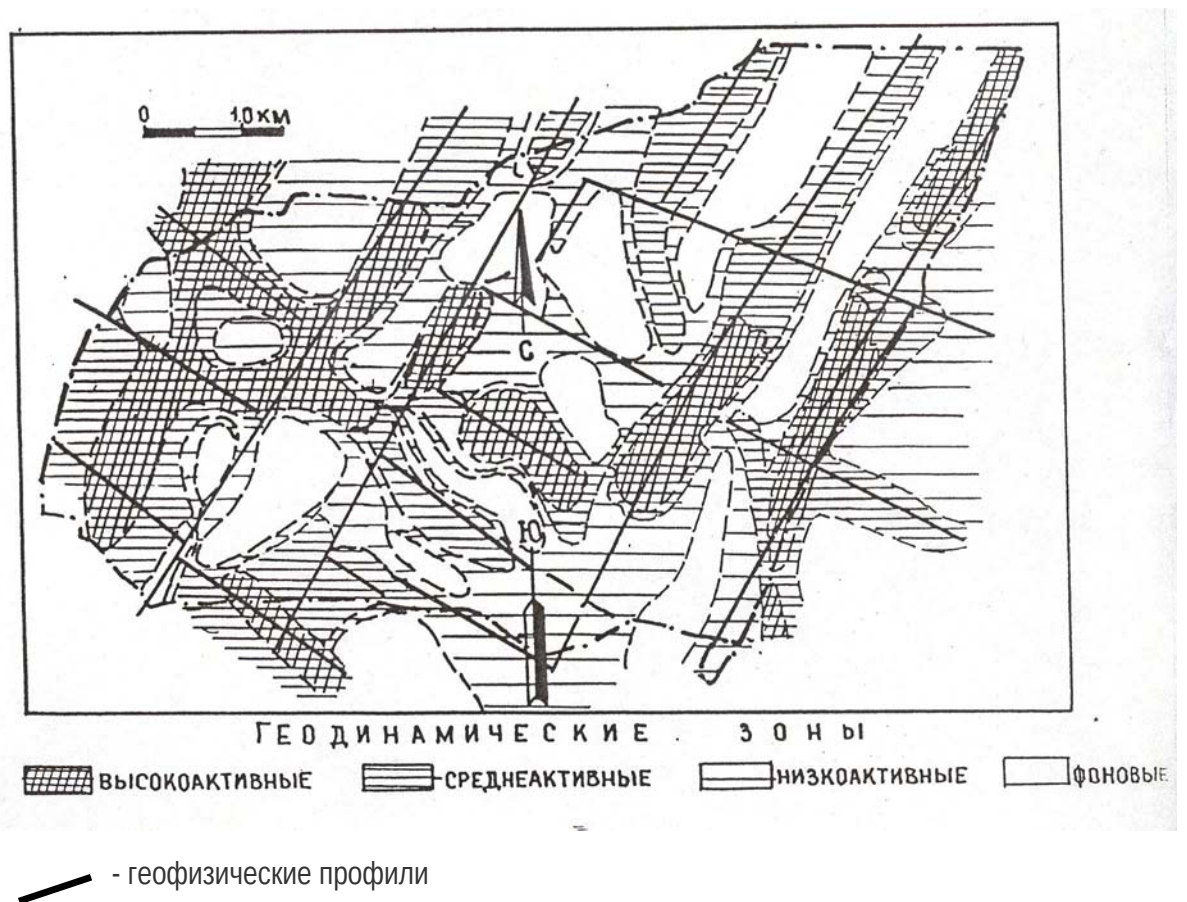


Рис.4.

На рис.3 представлена решетчатая система геодинамических зон на Ткибули-Шаорском месторождении угля, установленная методом структурно-геодинамического картирования по содержанию радиоактивных и метануглекислых газов в почвенном воздухе. На рис.4 тем же методом получена решетчатая структура геодинамических зон на участке строительства лабораторного корпуса на шахтном поле им. М.И. Калинина в г. Донецке. Таким образом, на всех уровнях геологического пространства - планетарном, региональном и локальном отмечаются отпечатки ротационного поля напряжений. Что же собой представляет геодинамическая зона?

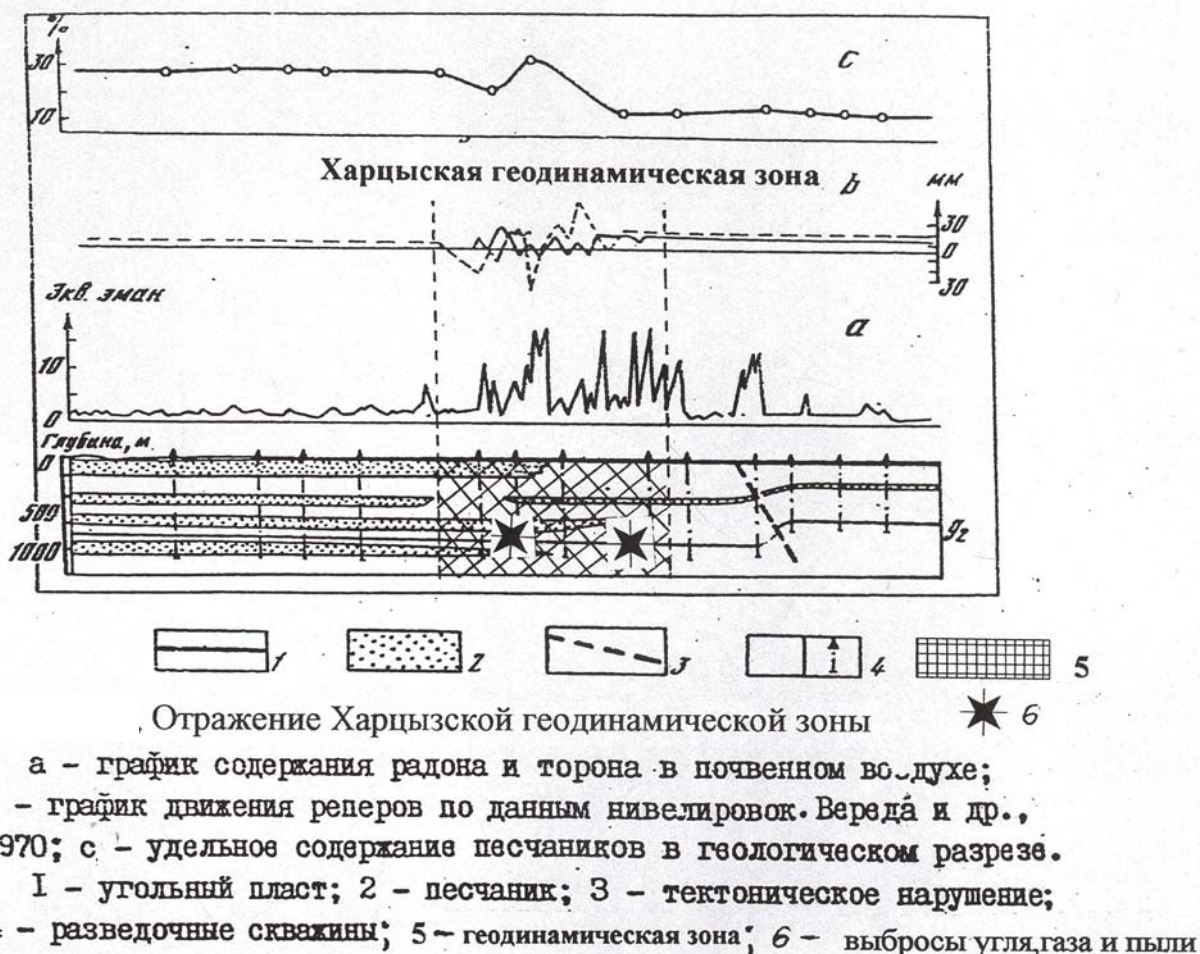


Рис.5.

На рис.5 показан пример комплексного изучения геологического разреза на одном из геодинамических полигонов Донбасса. Из разреза видно, что по данным геологоразведочных скважин не отмечается никаких тектонических нарушений, за исключением небольшого надвига Харцызского. В то же время, геодезические наблюдения показывают, что изучаемый участок расчленен на три блока с разным характером современных движений земной поверхности. Один блок не испытывает никаких движений, второй блок характеризуется равномерным поступательным

подъемом, а в расположенном между ними блоке происходят высокодифференцированные, значительные по амплитуде и знакопеременные движения земной поверхности. Этот блок с активными движениями и представляет собой крупную геодинамическую структуру - геодинамический шов. Из рисунка видно, что в районе геодинамического шва отмечается повышенное содержание изотопов радона - эманаций, в то же время, за его пределами концентрация эманаций значительно ниже. Кроме того, следует отметить, что различие наблюдается и в геологических характеристиках разреза. Например, содержание песчаников значительно отличается в блоках и геодинамическом шве. Это свидетельствует о неслучайном происхождении шва и его проявлениях еще в период осадконакопления и продолжающейся активности в современную эпоху. С современной активностью шва связаны выбросы угля и газа в шахте и отсутствие выбросов при ведении горных работ за пределами шва. На данном примере отчетливо показаны главные свойства и особенности геодинамических структур горного массива: их геологическая обусловленность и формирование в период осадконакопления. Многолетние режимные наблюдения за геодинамическими структурами в Донбассе показали, что для каждой из структур характерен свой спектр годовых и более высокочастотных изменений геодинамического режима. Внутренняя структура шовной зоны показывает, что она неоднородна, внутри шва отмечаются участки с особенно высокой активностью - геодинамические зоны. Анализ горных работ показал, что этим участкам соответствуют трещинные массивы, протяженные зоны списания угля по горно-геологическим условиям, выбросы угля и газа.

В соответствии с частотами движений земной поверхности, магистральные газопроводы и нефтепроводы испытывают не менее 15000-20000- циклов нагружения (сжатие-растяжение) в год. В связи с этим, различают два основных вида коррозии под механическим напряжением: коррозионное растрескивание (разрушение металлов под совместным воздействием статической нагрузки и агрессивности среды) и коррозионная усталость (разрушение при одновременном воздействии периодической нагрузки и агрессивной среды). Установлено, что при механическом нагружении на металл увеличиваются размеры уже имеющихся в теле начальных дефектов, а также зарождаются и развиваются трещины около других дефектов. Кроме того геодинамические зоны, имея различную глубину своего заложения, обладают различной степенью интенсивности и концентрации газовыделений CO_2 , CH_4 , H_2 , H_2S , SO_3 , H_2F , Cl , влияющих на процесс коррозии (газохимическое воздействие). Как указывается в работе [6] по данным инструментальных наблюдений установлено, что периодические горизонтальные перемещения земной поверхности в тектонических зонах достигает 70 мм. Это значит, что

трубопровод в пределах геодинамической зоны испытывает растягивающие и сжимающие усилия, способные вызвать гофр на трубе или разорвать кольцевой шов. Кроме того, металл сварочных швов, являющихся концентраторами напряжений, стареет и под влиянием механодинимических процессов грунтового основания из-за усталости металла утрачивает первоначальную прочность.

В связи с существованием периодических процессов сжатия - растяжения в трубопроводе, электрохимическая защита от коррозии может быть неэффективной в тех местах, где трубопровод испытывает механодинимическое и газохимическое воздействие со стороны грунтового основания. Не исключено, что автоколебательные движения трубопровода вызывают механическое отслоение изоляции трубопровода, из-за чего в пределах геодинамических зон развивается так называемая подпленочная коррозия. Приведенный механизм коррозионного повреждения трубопроводов подтверждается результатами существующих публикаций. В работе [6] отмечается, что коррозионные процессы усиливаются при геодинамической активности разрывных нарушений. Причем, это происходит двояким образом. С одной стороны, активизация разломов сопровождается увеличением концентрации химически агрессивного флюида. С другой стороны, значительное увеличение величины вертикальных и горизонтальных движений грунта в структурах приводит к эффекту "коррозия под напряжением". Приложение к металлу растягивающих напряжений ускоряет его коррозионное разрушение. Периодическое нагружение металла увеличивает скорость коррозии почти вдвое [11]. при этом опасна не столько скорость коррозии металла, сколько то, что напряжения способствуют локализации коррозии деформируемого металла.

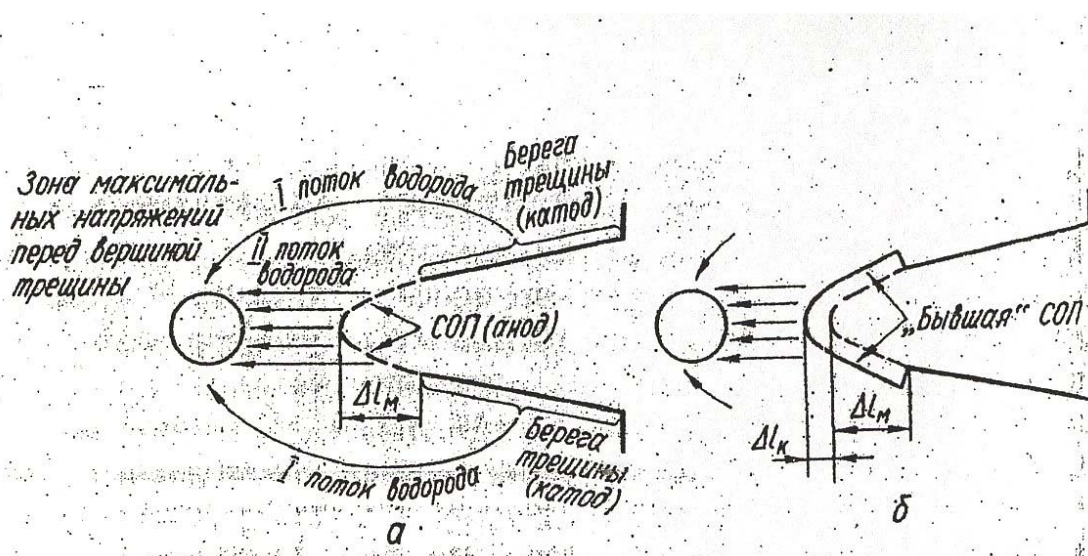


Рис.6. Механизм скачкообразного развития трещин коррозии под напряжением. [11]

Наличие агрессивной среды существенно ускоряет развитие трещин в нагруженном металле. Наличие в металле водорода значительно понижает трещиностойкость металлов. Установлено, что роль агрессивной среды существенно ускоряет развитие трещин коррозии под механическим напряжением и сводится к следующим факторам:

- а). локальная коррозия в вершине возникшей трещины;
- б). водородное охрупчивание (разупрочнение) металла в результате абсорбции водорода металлом из геологической среды;
- в). адсорбционное понижение прочности металла в результате абсорбции на его поверхности компонентов среды.

В трещине в результате гидролиза продуктов коррозии подкисляется исходная нейтральная среда, т.е. генерируются ионы водорода, которые, восстанавливаясь до атомарной формы, поступают в металл, не исключено поступление в металл водорода также и в форме ионов.

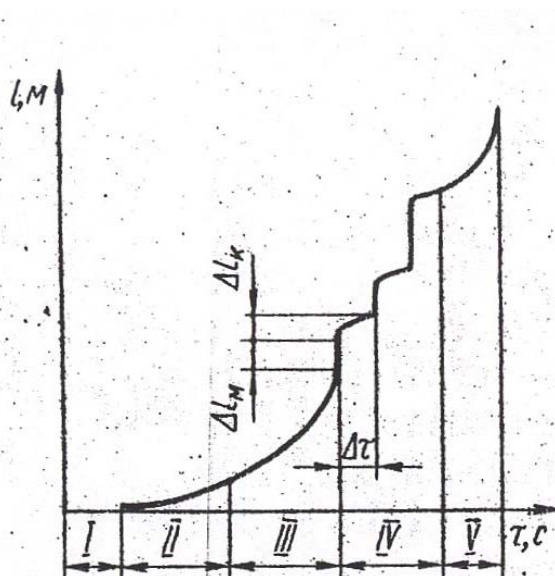


Рис.7. Поэтапное (I-V) развитие трещин коррозионного растрескивания [11]

На рис.7, показано поэтапное (I–V) развитие трещин коррозионного растрескивания[11]

I- этап – инкубационный, определяется временем до появления на поверхности металла анодных деформационных образований (линий и полос скольжения, локального разрыва пленок).

На II этапе происходит коррозионное зарождение трещины путем локальной коррозии по месту полосы скольжения (пара Эванса) или разрыва пленки. Этапы I – II являются чисто коррозионными.

На III- этапе - равномерно ускоренное подрастание уже зародившейся трещины в результате работы деформационной гальванопары.

На IV этапе трещина развивается скачкообразно вследствие реализации чисто механического скачка ее на величину Δl_m , протекающего мгновенно, и последующего чисто коррозионного углубления трещины на величину Δl_k в результате работы гальванопары СОП (свежеобразованная поверхность) - "старая" поверхность. При этом, концентрация водорода перед вершиной трещины увеличивается от фоновой до критической, достаточной для осуществления в зоне перед вершиной трещины критической комбинации из концентрации водорода и напряжений. На рис. 7 приведен механизм скачкообразного развития трещины коррозии под напряжением. Рис. 8 иллюстрирует основные электрохимические процессы в трещине в течение одного цикла усталостного нагружения на V этапе.

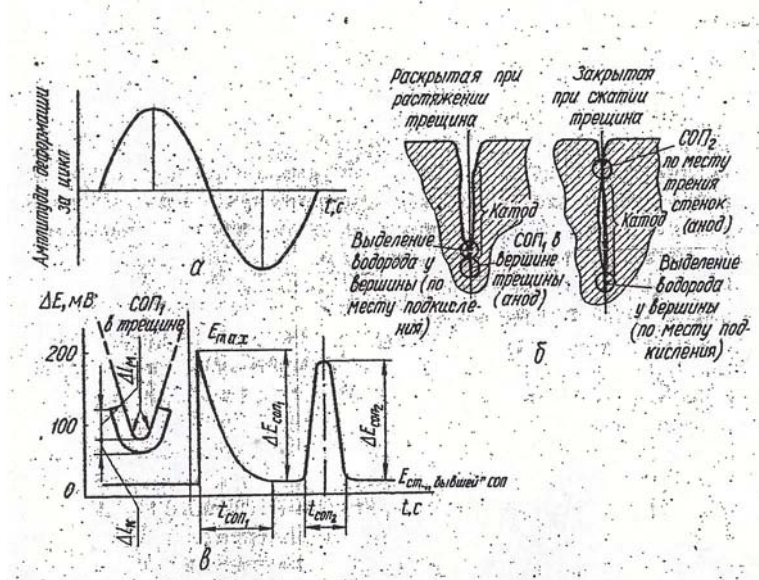


Рис.8. Основные электрохимические процессы в трещине в течение одного цикла усталостного нагружения на V этапе:

а – общая схема цикла; б – возникновение СОП в различные периоды цикла; в – механохимические Δl_m и коррозионное Δl_k подрастание трещины за цикл и скачки электродных потенциалов при образовании новой поверхности.

Подкисление среды в трещине возможно и вследствие диссоциации воды на поверхности металла. Водород, поступивший в металл вследствие протекания электрохимических процессов или диссоциации воды, преимущественно диффундирует в зону растягивающих напряжений перед вершиной трещины, разупрочняя там материал. При достижении в этой зоне критической (разрушающей) комбинации напряжение-водород реализуется скачок трещины из зоны перед вершиной к вершине, т.е. трещина скачкообразно подрастает на некоторую глубину. Таким образом, трещиностойкость металла труб определяется комплексом факторов, важнейшие из которых - структура и

состав материала, наличие в нем дефектов и растворенного водорода. Склонность металлов к коррозионному растрескиванию существенно зависит от концентрации электролита. Естественно, с увеличением его концентрации агрессивность среды растет. В целом, коррозионное растрескивание определяется уровнем приложенных напряжений, активностью ионов электролита и рН среды.

Особенно интенсивно коррозионное растрескивание протекает в сероводородосодержащих средах, в которых при взаимодействии металла и сероводорода выделяется водород. Ионы водорода в ходе катодного процесса восстанавливаются на поверхности металла, часть из них поступает в металл и способствует его коррозионно-механическому разрушению (процесс охрупчивания).

В работе [8] рассмотрен механизм зарождения микротрещин в связи с внедрением между зёрнами металла карбонат-бикарбонатной среды, образующейся на катодополяризованной поверхности трубы. Установлено, что процесс стресс-коррозии непосредственно связан с протекающими там микротоками. Усиление анодных токов, как провокатора стресс-коррозии, происходит при смещении потенциалов катодной защиты в положительном направлении от области требуемых значений. При этом накапливаются заряды, вызывающие известную (до 1 мм в год) скорость растрескивания. Данную картину дополняет тот факт, что главной составляющей грунтовых электролитов являются соли угольной кислоты, а углекислый газ, поступающий по геодинамическим зонам с больших глубин, усиливает их концентрацию.

Негативное воздействие геодинамических структур на магистральные нефтегазопроводы сводится к трем основным факторам:

- механодинамическому, связанному с местными колебаниями дневной поверхности горного массива;
- газохимическому, определяемому повышенным выходом из грунта коррозионно-активных газов (CO_2 , H_2S , SO_3 , H , F , Cl и др.);
- радиационному, заключающемся в воздействии альфа-частиц, образующихся при распаде радона и торона в геодинамических зонах, на коррозионную среду и, прежде всего, воду (радиолизный эффект). Образующиеся при радиолизе воды перекись водорода, озон и радикалы OH и H_2O_2 – энергичные катодные деполаризаторы, поэтому радиолизный эффект стимулирует катодный процесс, т.е. усиливает коррозию [10].

Таким образом, структурно-геодинамическое картирование при производстве инженерно-геологических изысканий на трассах проектируемых магистральных нефтегазопроводов позволяет:

- получать карты инженерно-геодинамического районирования с целью рациональной прокладки трасс трубопроводов с учетом энергосброса геодинамических блоков и геодинамических зон, как в естественных условиях, так и при техногенном воздействии;

- проводить геохимическую классификацию выделенных геодинамических зон по содержанию флюидов;

- при проектировании и строительстве, имея карту геодинамических зон, рационально размещать компрессорные станции, задвижки, катодную защиту вне геодинамических зон, в местах пересечения трубопроводом геодинамических зон необходимо планировать виды и объемы специальной инженерной подготовки грунтового массива (компенсаторы, щебенистые подушки, гибкий бетон, вязкий тампонаж, двойные трубы), а также вид и качество изоляционного материала для труб;

- на объектах с большим динамическим воздействием на горный массив (компрессорные станции, динамическое оборудование, взрывы) целесообразно проводить в процессе строительства и эксплуатации постоянный контроль за геодинамическим состоянием территории с целью ограничения подобных воздействий в периоды активизации геологических процессов;

- составлять графики капитального ремонта трубопроводов и осуществлять их в периоды геодинамического спокойствия горного массива;

- проводить мониторинг за состоянием горного массива с целью регулирования давления в трубопроводной системе.

Литература.

1. Васильев Ю.И., Борзяк И.П., Селюков Е.И. и др. Измерение механических напряжений в четвертичных отложениях Крыма, Изв.АН СССР, Физика Земли №10,1987
2. Витязь В.И. Периодичность размещения геологических структур платформенных областей Сибири, М.,Недра, 1982 г.
3. Взаимодействие водорода с металлами, АН СССР, М., Наука, 1987
4. Касьянова Н.А., Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика недр и ее влияние на объекты нефтегазового комплекса, М., Геоинформмарк, 1996 г.
5. Долицкий А.В. Образование и перестройка тектонических структур. Москва, Недра,1985г.
6. Лебедич С.П., Дворников В.Л., Селюков Е.И., Черепанов О.А., Рябоштан Ю.С. Геодинамическая активность и безопасная эксплуатация магистральных нефтегазопроводов, Горный вестник, №4, 1998 г.
7. Матвеев В.С., Баскакова И.Н., Ипполитова С.П., Судакова Т.А. О характеристике быстрых движений земной поверхности, приводящих к временным изменениям силы тяжести. Повторные гравиметрические наблюдения. Сб. научных трудов Межведомственного комитета при Президиуме АН СССР, М., 1988 г.
8. Мостовой А.В., Абдуллин И.Г., Гареев А.Г. Стресс-коррозия магистральных газопроводов, Горный вестник, №4, 1998 г.
9. Панжин А.А. Исследования короткопериодичных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии. Институт горного дела УРО РАН, Екатеринбург,2002 г.
10. Радиоллиз и коррозия в системе металл/вода/газ/ Н.Г.Петрик, А. Б. Александров, В. М. Седов, М. Н. Петров, В. Г.-Фомин // Труды II межд.конф.по радиац. возд. на констр. материалы термоядерных реакторов: С. -Петербург, ЦНИИ НИ "Прометей",1992
11. Петров Л.Н. Коррозия под напряжением, Киев, Из-во «Вища школа», 1986 г.
12. Рябоштан Ю.С., Селюков Е.И. Влияние ротационного поля напряжений на устойчивость территорий и инженерных сооружений. Труды научно-технической конференции «Сейсмостойкость крупных транспортных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях», 1-4 декабря 1998 г., М., АО ЦНИИС, 1999 г.
13. Рябоштан Ю.С., Селюков Е. И. и др. Современная нестабильность литосферы и безопасность трубопроводных коммуникаций и инфраструктур, Научно- технический журнал № 1, Нефтегазовое дело, 2003г.

14. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли, М.,Наука, Физматлит, 2002г.

15. Система обеспечения геодинамической и экологической безопасности при проектировании и эксплуатации объектов ТЭК (методические рекомендации), С-Петербург, 2001 г.

16. Тяпкин К.Ф., Бондарук А.К. О годичной компоненте вертикальных движений, Геофизический журнал, том 5, №1, Киев, Наукова думка, 1983 г.