



***Материалы
Первой
конференции геокриологов России***

3-5 июня 1996 г., МГУ им. М.В.Ломоносова

Книга 2

Часть 1. Физико-химия и механика мерзлых пород
Часть 2. Геокриологический прогноз и геоэкология

Москва, 1996 г.

Э.Д. Ершов, Е.М. Чувиллин, О.Г. Смирнова, Н.С. Налетова
(МГУ, каф. геокриологии)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕФТИ С КРИОГЕННЫМИ ПОРОДАМИ.

На территории нашей страны значительная часть эксплуатируемых в настоящее время месторождений нефти расположена в пределах области распространения многолетнемерзлых пород. Эксплуатация месторождений, а также транспортировка нефти действующими трубопроводами в сложных условиях криолитозоны нередко сопровождается аварийными ситуациями, одним из последствий которых является разлив нефти на поверхность мерзлых пород. Наряду с этим при активном хозяйственном освоении территорий используется большое количество разнообразной техники, топливом для которой служат различные нефтепродукты (дизельное топливо, керосин, бензин и др.). Загрязнение окружающей среды при утечках и растекании нефтепродуктов по поверхности представляет собой серьезную экологическую проблему для данных регионов.

Поэтому, в настоящее время отечественные и зарубежные исследователи столкнулись с необходимостью специального изучения поведения и особенностей переноса различных загрязняющих веществ в породах криолитозоны. Что касается минеральных загрязнителей (рассолов солей, ионов различных химических элементов, в том числе тяжелых металлов), то на сегодняшний день в этом направлении достигнуты определенные результаты. Получены данные о поведении ионов химических элементов в промерзающих и мерзлых породах, их подвижности в криолитозоне. Выявлены основные механизмы переноса, получены некоторые данные об ионной проницаемости криогенных сред [3, 9]. Однако перемещение загрязняющих органических веществ, в том числе природной нефти, как по поверхности, так и вглубь мерзлой породы, остается практически неизученным. Лишь в последнее время в этом направлении делаются попытки постановки специальных экспериментов с целью изучения процессов, протекающих в криогенных породах при их взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами. Так,

отдельные опыты по взаимодействию мерзлого грунта с керосином выполнены в Карлетонском университете (Канада) под руководством профессора П. Вильямса.

Следует отметить, что вопросами изучения миграции нефти в немерзлых горных породах занимались многие специалисты в области нефтяной геологии и геохимии, однако их интерес к этим вопросам связан прежде всего с изучением проблем образования нефтяных и газовых месторождений [6]. Поэтому большинство экспериментальных работ по изучению проницаемости различных пород и изменению состава и свойств нефти в процессе фильтрации и миграции через них проводились в условиях высоких положительных температур и при повышенном давлении [2].

В последние годы появились исследования поведения органических загрязнителей (в том числе нефти) в верхних почвенных горизонтах [4, 5]. Эти исследования показывают, что уровень накопления органических загрязнителей зависит от влажности, структуры порово-трещинного пространства, площади активной поверхности почв и т.д. При этом в процессе перемещения нефти в почвах наблюдалось ее фракционирование, расслоение по удельному весу, вязкости, плотности, активности взаимодействия с почвенной массой. С течением времени отдельные органические загрязнители в почвах разлагаются. Так, были получены экспериментальные данные по разложению в грунте бензина [8]. Однако отмечено, что скорость процессов разложения органических загрязнителей в почвах в значительной степени зависит от климатических условий, причем наиболее неблагоприятные условия для внедрения в почвенные комплексы продуктов разложения нефти - суровый климат тундры и лесотундры, где органические загрязнители сохраняются очень долго. Натурные наблюдения за нефтью, излившейся на мохово-лишайниковую поверхность тундры на Аляске свидетельствуют, что зимние разливы приводят к растеканию нефти по поверхности, при этом происходит увеличение площади пятна, в то время как летние разливы на оттаявший мохово-лишайниковый покров приводят к проникновению нефти вглубь почвенного горизонта [7]. Максимумы концентрации органических загрязнителей оказываются приуроченными к каналам внутрипочвенного стока и внутрипочвенным геохимическим барьерам. При этом на основе натурных наблюдений отмечается, что радиальная миграция нефтепродуктов в тундровых почвах ограничена верхней границей ММП [1], причем мерзлые породы в этом случае традиционно считаются

барьером для распространения загрязнений, в том числе и органической природы.

Опыта проведения специальных экспериментальных исследований, направленных на изучение миграции нефти в криогенных породах в условиях отрицательных температур практически нет. Поэтому, для успешного решения насущных экологических проблем, возникает необходимость постановок и проведения специальных экспериментов, направленных на изучение механизмов и закономерностей миграции нефти в промерзающих и мерзлых породах различного состава, строения и свойств при различных внешних условиях.

С целью изучения поведения нефти, а также различных нефтепродуктов при взаимодействии с мерзлыми породами разработана специальная программа экспериментальных исследований. В настоящее время проведено две серии экспериментов.

Первая серия включала опыты, рассматривающие особенности растекания нефти по горизонтальной поверхности мерзлой породы и льда под действием поверхностных сил.

Вторая серия была направлена на оценку возможности проникновения нефти вглубь мерзлой породы при их контактном взаимодействии.

Эксперименты по растеканию нефти по поверхности мерзлой породы выполнялись на образцах влагонасыщенного кварцевого песка и льда, замороженных в холодильной камере при температуре -6°C . Наблюдения за особенностями растекания нефти по их поверхности проводились при температурах -1°C и -6°C .

Опыты по изучению проникновения нефти вглубь мерзлой породы были осуществлены при температуре -6°C на образцах песка и суглинка (степень заполнения пор $q=1$ и $q<1$), которые были быстро заморожены при низкой отрицательной температуре для получения однородного криогенного строения и равномерного распределения влажности и льдистости в объеме образца. Замороженные образцы грунта были приведены в контакт с нефтью, причем рассматривались два случая: нефть располагалась сверху и снизу от образца мерзлого грунта.

В работе была использована природная северная нефть Новопортовского месторождения с глубины 989-1003 м, а также смесь нефтей из

нескольких месторождений севера Западной Сибири, поступающая по трубопроводу на Московский нефтеперерабатывающий завод. Исследования состава и свойств нефти были проведены на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ. По данным анализов новопортовская нефть имеет достаточно высокое значение относительной плотности ($d_4^{20}=0,920$), плотность западносибирской нефти - средняя ($d_4^{20}=0,8696$). В составе легкой бензиновой фракции западносибирской нефти (составляющей 19,7%) присутствует значительное количество углеводородов парафинового ряда (содержание алканов достигает 70,5%), что обуславливает ее быстрое застывание в результате охлаждения. Уже при температуре $+2^\circ\text{C}$ нефть теряет подвижность. Новопортовская нефть содержит меньшее количество легких фракций (от начала кипения до 250°C - 3%). При этом незначительное количество твердых парафинов (0,87%) позволяет этой нефти сохранить подвижность и при отрицательной температуре.

Учитывая высокую температуру застывания западносибирской нефти ($+2^\circ\text{C}$), особенно важным представлялось проследить ее поведение при отрицательной температуре, в случае аварии трубопровода в зимнее время. Как показали экспериментальные исследования, при попадании такой нефти на лед скорость ее растекания невелика. В лабораторных условиях вокруг пятна нефти диаметром 1,5 см фиксируется образование очень тонкой пленки (каймы) растекания. Ее размеры зависят от температурных условий. Так, за время проведения опыта, равное одному месяцу, при температуре -1°C кайма растекания в разных направлениях достигла размеров в 5-10 раз больших, чем при более низкой -6°C отрицательной температуре.

При растекании нефти по поверхности влагонасыщенного мерзлого кварцевого песка вокруг пятна нефти образовалась не тонкая пленка, а некий "ореол" растекания в виде пропитанного нефтью "сырого песка", который в дальнейшем будем также называть каймой. В отличие от опытов со льдом, где растекание нефти было очень медленным, растекание по мерзлому грунту происходило более активно. В первые сутки темп растекания был наиболее интенсивным, затем он снижался. При этом за одинаковое время ведения эксперимента размеры каймы растекания по поверхности мерзлого песка больше чем на порядок превышали размеры каймы растекания по поверхности льда. При понижении отрицатель-

ной температуры от -1°C до -6°C размеры каймы растекания по поверхности мерзлого песка уменьшились в 2-3 раза по разным направлениям.

Таким образом, проведенные исследования показали, что на интенсивность процесса растекания нефти по поверхности мерзлых пород оказывает влияние как характер поверхности, так и температурные условия и свойства самой разливающейся нефти. При одних и тех же температурных условиях нефть значительно больше растекается по поверхности мерзлой породы, чем по поверхности льда - за счет смачивания и иных процессов, причем размер каймы в этом случае увеличивается более чем на порядок. При понижении отрицательной температуры интенсивность растекания нефти уменьшается, что связано с увеличением ее вязкости и процессом застывания при отрицательной температуре. При этом очевидно, что чем ниже температура застывания нефти, тем интенсивнее она растекается. Однако даже нефть, имеющая температуру застывания $+2^{\circ}\text{C}$, с течением времени постепенно растекалась по поверхности мерзлых пород. Скорость ее растекания в среднем составляла первые сантиметры в месяц. В случае, если нефть имеет температуру застывания более низкую, чем температура окружающей среды (например, новопортовская нефть) скорость ее растекания может достигать первых метров в месяц.

Опыты по изучению проникновения нефти вглубь мерзлой породы показали, что этот процесс, главным образом, связан с пустотностью исследуемой породы. Миграции нефти в образцы мерзлого песка и суглинка с полным водонасыщением ($q=1$), где все поровое пространство заполнено льдом и незамерзшей водой, отмечено не было, что, очевидно, обусловлено особенностями строения льда, который является барьером для проникновения нефти. Переноса нефти пленками незамерзшей воды не происходит, поскольку нефть практически не растворима в воде. Однако в экспериментах фиксируется перенос нефти по поверхности мерзлого грунта, что может приводить к ее локальному накоплению в трещинах, пустотах, других локальных дефектах, даже при степени заполнения пор мерзлого грунта близкой к 1.

В экспериментах с образцами песка с неполной степенью заполнения пор ($q<1$) было четко зафиксировано насыщение мерзлого грунта нефтью за счет миграции под действием поверхностных сил по свободному поровому пространству. Особо следует обратить внимание на тот случай, когда источник нефти

находился под образцом мерзлого песка, когда поднятие нефтяной "каймы" не связано с процессами гравитационного просачивания, что возможно в случае нахождения источника над малюльистой мерзлой породой. Контакт между насыщенными и ненасыщенными нефтью частями образца был четкий и легко определялся визуально. Граница каймы была неровная, с карманами. Высота ее поднятия составила 10-20 мм за полтора месяца при температуре -6°C .

Таким образом, наличие в мерзлой породе незаполненного поровым льдом пространства дает возможность нефти проникать вглубь мерзлой породы не только под действием сил гравитации сверху вниз, но и мигрировать снизу вверх под действием поверхностных сил минерального скелета. Наличие же льда препятствует передвижению нефти как вглубь, так и по поверхности породы. Поэтому, именно лед в мерзлых породах должен обуславливать их свойства как геохимического барьера при миграции нефтепродуктов (например, при загрязнении деятельного слоя в результате разлива нефти и нефтепродуктов). Мерзлые породы, имеющие незаполненное льдом поровое пространство в значительно меньшей степени могут сдерживать проникновение загрязняющих органических веществ. Полученные результаты справедливы прежде всего для нерастворимых в воде органических веществ (нефть, бензин, керосин и т.д.). В случае взаимодействия мерзлых пород с растворимыми в воде органическими веществами (например, этиленгликоль, который широко используется на севере как антифриз) необходимо учитывать их способность, подобно солевым растворам, растворять лед, а также мигрировать по пленкам незамерзшей воды. В целом, в этом направлении необходимо проводить специальные дополнительные исследования.

Литература:

1. Гусева О.А. Опытное моделирование процессов миграции нефти и нефтепродуктов в разных типах тундровых почв ЕТР. В сб.: Геоэкология в нефтяной и газовой промышленности. Тез. докл. научно-технической конференции. М., ГАНГ им. И.М.Губкина, 1995, с. 8-9.
2. Миляшина А.Г., Калинин М.К., Сафонова Г.И. Изменение нефтей при фильтрации через породы. М., Недра, 1983.

3. Основы геоэкологии. Часть I. Физико-химические основы геоэкологии. Под ред. Э.Д.Ершова. М., изд-во МГУ, 1995.
4. Солнцева Н.П. Закономерности поведения нефти в почвах. Основные процессы, механизмы и модели. В сб.: Геоэкология в нефтяной и газовой промышленности. Тез. докл. научно-технической конференции. М., ГАНГ им. И.М.Губкина, 1995, с.13-14.
5. Солнцева Н.П. Нефть в почвах тундры ЕТР. Уровни накопления, закономерности миграции. В сб.: Геоэкология в нефтяной и газовой промышленности. Тез. докл. научно-технической конференции. М., ГАНГ им. И.М.Губкина, 1995, с. 12-13.
6. Хант Д. Геохимия и геология нефти и газа. М., Мир, 1982.
7. Collins C.M. , Racine C.H., Walsh M.E. Fate and effects of crude oil spilled on subarctic permafrost terrain in interior Alaska: Fifteen years later. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 93-13.
8. Hewitt A.D. Concentration Stability of four volatile organic compounds in soil subsamples. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 94-6.
9. Marion G.M. Freeze-thaw process and soil chemistry. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 94-xx.