



**МАТЕРИАЛЫ
Второй
конференции геокриологов России**

МГУ им. М.В. Ломоносова

6 - 8 июня 2001 г.

ТОМ 1

Часть 1. Физико-химия и механика мерзлых пород

Часть 2. Литогенетическая геокриология

Издательство Московского университета

2001

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

Введение. Развитие нефтегазовой отрасли в районах распространения многолетнемерзлых пород и глубокого сезонного промерзания часто сопровождается загрязнением территории нефтью и нефтепродуктами. Это может привести к изменению радиационно-теплового баланса поверхности мерзлых пород, активизации криогенных процессов, а также к изменению свойств грунтов (Collins et al., 1993). Проводимые в северных регионах исследования углеводородного загрязнения в основном ограничиваются сезонно талым слоем, а мерзлые породы традиционно считаются непроницаемыми для органических загрязнителей (Солнцева, 1998). В этой связи многие вопросы, касающиеся углеводородного загрязнения криолитозоны, в том числе миграция нефтяных компонент в мерзлых породах, изучены крайне слабо.

Появившиеся в последнее время лабораторные (Chuvilin et al., 1999, 2000) и полевые (Biggar et al., 1998) исследования показали, что наличие льда-цемента и ледяных прослоев, хотя и является существенным препятствием для проникновения нефтяного загрязнения, полностью прерывать миграционный поток загрязнителя не может. Проницаемыми оказываются даже льдистые мерзлые породы.

На интенсивность проникновения нефти в мерзлые породы влияют многие факторы (состав и строение пород, состав нефтяного загрязнителя, температурные условия и др.), однако имеющиеся на сегодняшний день фактические данные не позволяют провести оценку влияния этих факторов на перенос и накопление нефтяных компонент в мерзлых породах. В этой связи были поставлены специальные экспериментальные исследования, направленные на выяснение основных закономерностей миграции нефти в мерзлых породах.

Характеристика объекта исследований. Эксперименты проводились на грунтах нарушенного сложения (песок кварцевый, супесь полиминеральная, глина каолинистая). Характеристики грунтов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные характеристики исследуемых пород

Грунт	ρ_s , г/см ³	Пределы пластичности		Гранулометрический состав			Наименование грунтов (песчаных - по Е.М. Сергееву; глинистых - по В.В. Охотину)
		W _p , %	W _L , %	2-0,05	0,05-0,002	<0,002	
песок	2,65	-	-	94,8	3,0	2,2	песок мелкозернистый
супесь	2,68	22,2	26,2	41,8	52,2	6,0	супесь тяжелая пылеватая
глина	2,66	3,0	45,8	4,5	62,9	32,6	глина пылеватая

В опытах использовались разные по составу и свойствам нефти (Табл.

2).

Таблица 2.

Характеристики исследуемых нефтей

Нефть	t застывания, °C	Плотность, d_4^{20}	Вязкость, МПа/с (20°C)	t начала кипения, °C	Фракционный состав, %
№1	+5°C	0,8660	20	50	50 - 100°C - 1,24 100 - 130 °C - 3,86 130 - 200 °C - 20,34
№2	+2°C	0,8692	27	60	122 - 150°C - 2,6 150 - 200°C - 17,1
№3	-11°C	0,9200	-	58	58 - 100°C - 3,6 100 - 200 °C - 13,1
№4	-23°C	0,8220	7	68	68 - 100°C - 2,5 100 - 200 °C - 29,0

Методика экспериментальных исследований. Эксперименты проводились на искусственно приготовленных мерзлых образцах с заданными параметрами влажности, плотности и льдистости с массивной криогенной текстурой. В основном образцы грунтов имели степень заполнения пор влагой (G) близкую к 1. Размер образцов составлял 5х5х10 см. В основу экспериментов был положен контактный метод взаимодействия подготовленных мерзлых образцов с нефтью. Замороженные образцы помещались в высокую емкость на пропитанную нефтью пористую губку и плотно закрывались крышкой. Опыты проводились в изотермических температурных условиях (-1,5, -7 и -20 °C). Время опыта составляло от 7 до 180 суток.

По окончании опытов проводилось изучение строения образцов, слойное определение влажности, плотности и содержания нефти по высоте

образцов. Содержание нефти, ее состав и свойства определялись на кафедрах геологии и геохимии горючих ископаемых МГУ им. Ломоносова и нефтепродуктообеспечения и газоснабжения РГУ им. Губкина.

Результаты экспериментальных исследований. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют проследить влияние следующих факторов: льдистости и дисперсности мерзлых пород; состава (свойств) нефти, а также условий опыта - температуры и времени взаимодействия нефти с мерзлым грунтом.

Влияние льдистости. Одним из основных факторов, влияющих на перенос нефтяного загрязнения в мерзлых породах, является их льдистость. Увеличение льдистости приводит к заметному снижению проникновения нефти в образец. Так, в опытах было зафиксировано значительное снижение накопления нефти при увеличении степени заполнения пор льдом от 0,45 до 0,75. При дальнейшем увеличении льдистости до ~1 снижения накопления нефти практически не наблюдалось (рис. 1).

В мерзлых породах с неполной степенью заполнения пор льдом существуют сплошные поровые каналы, по которым может осуществляться объемный перенос нефти под действием капиллярных (менисковых) сил. Этот механизм переноса нефти при невысокой степени заполнения льдом порового пространства может быть преобладающим.

В льдонасыщенных породах пути для объемной миграции нефти отсутствуют. Их нефтяное загрязнение связано с проникновением наиболее подвижных в данных условиях компонент, выделяющихся из общего объема нефти. Пути их миграции могут служить микротрещины и микрокапилляры в породе, а также пленки незамерзшей воды для растворимых компонент нефти.

Возможность проникновения нефтяного загрязнения в льдонасыщенные породы ($G \sim 1$) была подтверждена для грунтов различной дисперсности в широком диапазоне отрицательных температур.

Влияние дисперсности. Экспериментально зафиксировано, что в ряду песок - суглинок - глина проникновение нефти в грунт увеличивается (рис.2). Большая проницаемость льдонасыщенного глинистого грунта, по сравнению с песком, связана с увеличением содержания незамерзшей воды при переходе

от песка к глине, что позволяет летучим и растворимым компонентам нефти проникать вглубь породы.

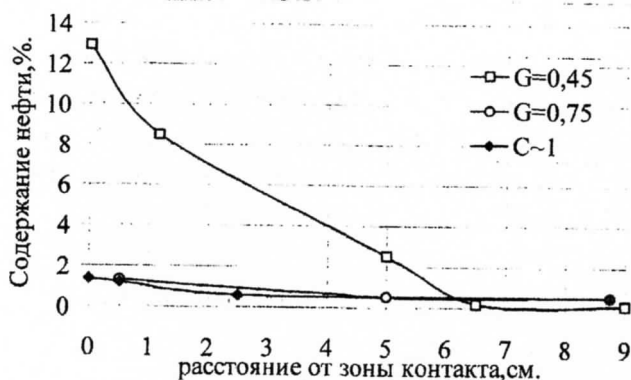


Рис. 1. Распределение нефти №3 в образцах мерзлого песка ($t=-70^{\circ}\text{C}$; время 7 суток)

Влияние состава нефти. Интенсивность проникновения нефтяного загрязнения в мерзлую породу зависит от состава нефти, который во многом определяет ее поведение. Большую миграционную способность, как правило, имеют нефти с более низкой температурой застывания ($t_{\text{заст.}}$) - температурой, при которой нефть теряет свою подвижность.



Рис. 2. Распределение нефти №4 в льдонасыщенных образцах ($t=-70^{\circ}\text{C}$; время 14 суток)

Экспериментально было выявлено, что в мерзлых образцах накопление нефти с $t_{\text{заст.}} - 23^{\circ}\text{C}$ больше, чем с $t_{\text{заст.}} +2$ и $+5^{\circ}\text{C}$ (таб. 3).

Таблица 3.

Распределение содержания нефтей (Sn, %) разного состава по глубине образцов мерзлого песка ($t = -7^{\circ}\text{C}$; время 60 суток)

Расстояние от зоны контакта, см	Нефть №1 (Sn, %)	Нефть №2 (Sn, %)	Нефть №4 (Sn, %)
0-1,5	0,07	0,74	0,49
3,0-4,5	0,05	0,48	1,04
6,0-7,5	0,13	0,46	0,64
7,5-9,0		0,21	

Влияние температуры опыта и времени взаимодействия. Эксперименты показали, что нефть может проникать в мерзлые породы при достаточно низких отрицательных температурах (до -20°C и ниже). Температура окружающей среды при этом может быть значительно ниже температуры застывания нефти (табл. 4).

В целом с понижением температуры опыта накопление нефти в образцах мерзлых пород снижается (табл. 4). Однако, вследствие сложных структурообразовательных процессов, протекающих в некоторых нефтях при понижении температуры возможны нарушения этой закономерности.

Таблица 4.

Суммарные накопления и плотности миграционных потоков (In) нефти при разных температурах и времени взаимодействия

Грунт	Тип нефти	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Время, сут.	Суммарное накопление, $\text{г}/\text{см}^2$	In, $\text{г}/\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot 10^{-8}$
песок	№4	-7	60	0,11	2,11
песок	№4	-1,5	14	0,10	8,25
песок	№4	-7	14	0,03	2,28
песок	№4	-20	14	0,006	1,19 ³
глина	№2	-20	180	0,03	0,2
глина	№2	-7	180	0,022	0,14

Так, при температуре опыта -20°C наблюдалось аномально высокое накопление нефти №2 ($t_{\text{заст}} = +2^{\circ}\text{C}$) по сравнению с температурой -7°C (табл. 3). Подобное поведение нефти №2 возможно связано с особенностями изменения ее состава и свойств при изменении температуры (с кристаллизацией отдельных компонент, в частности, парафинов). При этом относительная подвижность других нефтяных компонент может возрастать, а вязкость нефти в целом снижаться (Шаммазов и др., 1998). Полученные нами данные по изменению вязкости нефти №2 в спектре температур от $+20$ до -5°C показыва-

ли, что при малых скоростях сдвига (25 сек^{-1}) вязкость этой нефти при температуре -5°C ниже, чем при 0°C (табл. 5).

Таблица 5.

Изменение вязкости нефти при понижении температуры

Тип нефти	скорость сдвига, сек^{-1}	Вязкость, МПа/с		
		$+10^\circ\text{C}$	0°C	-5°C
№1	25	55	806	847
№2	25	147	615	584
№4	500	7,5	8,5	10

У остальных исследуемых нефтей вязкость закономерно увеличивалась с понижением температуры опыта (табл. 5).

Увеличение времени проведения опыта приводит к увеличению накопления нефти в мерзлых породах. Интенсивность накопления (плотность миграционного потока нефти - J_n) при этом со временем снижается (табл. 4).

Следует отметить, что распределение содержания нефти по высоте льдистых образцов часто имеет неравномерный характер. Горизонт максимального накопления нефти может смещаться со временем из приконтактной зоны вглубь образца. В льдистых породах нефть, по-видимому, движется не единым фронтом как однородное вещество, а отдельными фракциями с разной скоростью проникновения.

Выводы. Экспериментальные исследования показывают, что мерзлые породы, в том числе и льдонасыщенные, проницаемы для нефти. Пути миграции при этом являются незаполненные льдом поры, микротрещины, а также пленки незамерзшей воды.

Проникновение нефти в мерзлые породы фиксируется в широком спектре отрицательных температур (до -20°C и ниже) и зависит от дисперсности мерзлых пород и состава (свойств) нефти. В целом накопление нефти уменьшается с понижением температуры. Льдонасыщенные глинистые грунты более проницаемы для нефтяных компонент вследствие большего содержания в них незамерзшей воды по сравнению с песчаными.

Наибольшей миграционной способностью отличаются нефти с более низкой температурой застывания.

Нефть может мигрировать в мерзлые породы даже при температурах значительно ниже своей температуры застывания. В этом случае возможно

аномально высокое накопление нефти при низких температурах, связанное с особенностями изменения ее состава и свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солнцева Н. П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М., изд-во МГУ, 1998, 365 с.
2. Шаммазов А. М., Кутуков С. Е., Арсентьев А. А., Самигуллин Г. Х., Шматов А. А. Комплексное исследование реологических и адгезионных свойств нефтей в диапазоне температур кристаллизации. Нефть и газ, 1998, №4, с. 63-72.
3. Biggar K. W., Haidar M., Nahir M., Jarrett P. M. Site Investigations of Fuel Spill Migration into Permafrost. Journal of Cold Regions Engineering 12 (2), 1998, p. 84-104.
4. Chuvilin E. M., Naletova N. S., Miklyaeva E. S. Behaviour Mineral and Organic Contaminants in Permafrost In: Proceedings, Assessment and Remediation of Contaminated Sites in Arctic and Cold Climates, Edmonton, Canada, 1999, p. 52-56.
5. Chuvilin E.M., Yershov E. D., Naletova N.S., Miklyaeva E.S. The use of permafrost for the storage of oil and oil products and the burial of toxic industrial wastes in the Arctic. Polar Record 36 (198), 2000, p. 211-214.
6. 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. Hanover, NH: Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL Report 93-13).

Е.М. Чувилин, Е.В. Перлова, Д.В. Дубиняк
(МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра геокриологии)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ П-ВА ЯМАЛ

Введение. При бурении разведочных и эксплуатационных скважин в областях распространения многолетнемерзлых пород в ряде районов фиксируются многочисленные выбросы газа с небольших (до 100-150 м) глубин из интервалов вечной мерзлоты. Подобные газопроявления широко распространены на севере Западной Сибири, в частности, на Бованенковском ГKM и Ямбургском ГKM, Арктическом побережье Канады, на Аляске, а также в некоторых других районах [1, 2, 3]. Выбросы газа иногда отличаются высокой интенсивностью и большими дебитами, близкими к промышленным. Подобные активные газовыделения из скважин со стабильным дебитом могут продолжаться в течение нескольких месяцев [4]. При этом исследования, проведенные в последние годы, указывают на