

ВЛИЯНИЕ ПАВОДКОВОЙ ВОДЫ И НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ТЕПЛОМАССООБМЕННЫЙ РЕЖИМ ГРУНТА

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 03-05-65408.

Приводятся математические модели тепломассопереноса с учетом процесса промерзания – протаивания порового раствора мерзлого грунта и результаты численного эксперимента при нефтяном загрязнении (на примере г. Ленска).

В Республике Саха (Якутия) река Лена является основной артерией для перевозки груза в период навигации. Грузоприемные причалы, нефтебазы и другие населенные пункты расположены на берегу реки и весной могут затопляться паводковой водой. В 2001 г. уровень воды, в результате образования затора льда, достиг максимальной отметки 2012 см над нулевым уровнем водомерного поста г. Ленска. Город был полностью затоплен, в том числе Ленская нефтебаза, обеспечивающая горюче-смазочным материалом всю алмазодобывающую промышленность. Было повреждено 60 % резервуаров нефтебазы, при этом потери нефтепродуктов составили 11267,1 тонн, из них 9225,1 т поступило в окружающую гидрогеологическую среду [1].

Эксплуатация месторождений нефти, транспортировка и его хранение в районах многолетней мерзлоты нередко сопровождается аварийными ситуациями, одним из последствий которых является разлив нефтепродуктов.

Например, по данным голландских экспертов IWA-SO на территории Западно-Сибирской нефтяной провинции загрязненная площадь составляет 700–840 тыс. га [2]. В результате этого уничтожен растительный покров, нарушен поверхностный сток, изменились тепломассообменные условия на поверхности грунта.

Проблемы миграции загрязняющих веществ в мерзлые породы и их утилизации имеют актуальное значение. В районах криолитозоны, где мощности сезонно-талого слоя ограничены, интенсивность нефтяного загрязнения повышается. При этом основной особенностью нефтяного загрязнения является формирование техногенной геохимической аномалии в самой верхней части водоносного пласта, что обуславливается меньшей плотностью нефтепродуктов. В пределах аномалии из-за неравномерности загрязнения обычно выделяются три зоны [3]:

- в первой зоне нефть находится в виде пленки («плавающая линза»);
- во второй (переходной) наблюдается образование эмульсии воды в нефти и далее по потоку – нефти в воде;
- в третьей (зона окислительных условий) – подземные воды содержат нефтяные углеводороды в растворенном состоянии.

Отсюда следует, что в грунтах нефтепродукты находятся в виде пленки и эмульсии, а также в растворенном состоянии. Основным механизмом переноса нефтепродуктов двух последних видов является их миграция вместе с грунтовой водой.

Выбор модели фильтрации определяется относительным содержанием нефти и поровой воды в дисперсной среде. Когда содержание нефти в воде значительно для описания движения смеси несмешивающихся жидкостей в пористой среде, необходимо использовать модели теории многофазной фильтрации. В случае же, когда нефть в поровой воде содержится в виде диспергированной фазы (эмульсии) или в растворенном состоянии,

миграцию загрязненной грунтовой воды можно описать как фильтрацию однородной жидкости.

В данной работе представлены модификация математической модели теплосолевлагопереноса с учетом фазового перехода порового раствора в спектре температур и результаты численного эксперимента при различных мерзлотных условиях. Математическая модель при профильной (в вертикальном разрезе) фильтрации в промерзающих – протаивающих мерзлых грунтах описывается следующей системой уравнений [4]:

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - c_b V_r \frac{\partial T}{\partial r} - c_b V_z \frac{\partial T}{\partial z} + L \rho \frac{\partial W_{\text{л}}}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_b}{\partial \tau} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v k_{\phi} \frac{\partial H}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\phi} \frac{\partial H}{\partial z} \right) - \frac{\partial \theta_{\text{л}}}{\partial \tau}, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial W_b}{\partial \tau} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v k \frac{\partial W_b}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial W_b}{\partial z} \right) - \frac{\partial k_{\phi}}{\partial z} \cos(\bar{\theta}) - \frac{\partial k_{\phi}}{\partial z} \sin(\bar{\theta}) - \frac{\partial W_{\text{л}}}{\partial \tau} \right). \quad (2^*)$$

$$\frac{\partial (W_b C_b)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v D \frac{\partial C_b}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C_b}{\partial z} \right) - \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v V_r C_b \right) - \frac{\partial}{\partial z} (V_z C_b) - \frac{\partial W_{\text{л}} C_{\text{л}}}{\partial \tau} - \frac{\partial N}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial \tau} = \beta \left(C - \frac{N}{k_d} \right), \quad (4)$$

$$(r, z) \in \Omega, \tau > 0, \Omega = [0, R] * [0, H],$$

где $c = (c_{\text{ск}} + c_b W_b + c_{\text{л}} W_{\text{л}}) \rho_{\text{ск}}$, $W = W_b + W_{\text{л}}$,

$$\theta = \theta_b + \theta_{\text{л}}, \quad \theta = \frac{W \rho_{\text{ск}}}{\rho_b \rho_{\text{л}}} (\rho_{\text{л}} + (\rho_b - \rho_{\text{л}}) i(T)),$$

$$C = (W_b C_b + W_{\text{л}} C_{\text{л}}) / 100, H = P - z,$$

$$V_r = -k_{\phi} \frac{\partial P}{\partial \tau} + k_{\phi} \sin(\bar{\theta}), V_z = -k_{\phi} \frac{\partial P}{\partial z} + k_{\phi} \cos(\bar{\theta}).$$

Система уравнений (1)–(4) замыкается уравнением количества незамерзшей воды

$$W_{\text{нв}} = W_{\text{нв}}(T, W, C)$$

и условием замерзания порового раствора

$$C_{\text{л}} = k_{\text{зк}} C_b. \quad (5)$$

При этом можно задать следующие граничные условия:

$$-k_{\phi} \left(\frac{\partial P}{\partial z} - 1 \right) = R(r, \tau), 0 \leq r \leq R, z = 0, \quad (6)$$

$$k_{\phi} \left(\frac{\partial P}{\partial z} - 1 \right) = Q(r, \tau), 0 \leq r \leq R, z = Z, \quad (7)$$

$$k_{\phi} \left. \frac{\partial P}{\partial z} \right|_{r=0} = \begin{cases} 0, & T < 0, 0 \leq z \leq Z, \\ q_{b, \tau}, & T > 0, 0 \leq z \leq Z, \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0, r = R, 0 \leq z \leq b, b_2 \leq z \leq Z, \quad (9)$$

$$P = 0, r = R, b \leq z \leq b_1, \quad (10)$$

$$P = z - b_1, r = R, b_1 < z < b_2, \quad (11)$$

где c – объемная теплоемкость грунта, Дж/(м³·К); T – температура, К; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); τ – время, с; L – удельная теплота фазового перехода, Дж/м³; W – суммарная влажность, % (масса всей влаги/масса скелета); θ – объемная влажность, % (отношение объема влаги к объему пор); H – напор, м; P – всасывающее давление влаги (м); r, z (ось z направлена вертикально вниз) – пространственные координаты, м; k – коэффициент диффузии, м²/с; k_f – коэффициент фильтрации, м/с; D – коэффициент конвективной диффузии примеси, м²/с; $V = (V_r, V_z)$ – скорость фильтрации, м/с; V_r, V_z – компоненты скорости; C_b, C_l – концентрации примеси в воде и льду, %; $\bar{\theta}$ – угол наклона поверхности к горизонту; N – концентрация примеси в почвенно-поглощающем комплексе, %; β – коэффициент скорости обмена, 1/с; k_d – коэффициент распределения примеси.

Уравнение (1) учитывает процесс промерзания–протаивания порового раствора с учетом фильтрации жидкой фазы. Движение самого порового раствора (воды) с учетом льдовыведения описывается аналогичным уравнением параболического типа (2). Выражения (3), (5) характеризуют процесс солепереноса в промерзающих – протаивающих грунтах. Выражение (2) называется потенциальной, (2*) – влажностной формами уравнения влагопереноса.

На поверхности земли (верхней границе) может быть задано условие инфильтрации снеговой воды (промстока) или испарения (6), а в основании – граничное условие типа (7). На левой границе области может задаваться как напор надмерзлотных грунтовых вод, так и условие непротекания (8). На правой границе задаются аналогичные граничные условия с учетом выноса загрязненной воды и напора сезонной динамики речной воды (9)–(11). На участке выноса $r = R, b \leq z \leq b_1$, задаются два условия: $P = 0$ и $-(k_f \text{ grad } H) > 0$, второе из которых используется для определения верхней границы участка высачивания. На участке границы, где проток V втекает внутрь области, а также на нагнетательных дренах (скважинах), задаются условия:

$$(D \text{ grad } S - VS)_n = -VS_v, (\lambda \text{ grad } T - c_v VT)_n = c_v VT,$$

где S_v, T_v – концентрация и температура втекающего раствора. А на участках границы, где поток вытекает:

$$(D \text{ grad } S - VS)_n = 0, (\lambda \text{ grad } T - c_v VT)_n = 0.$$

На поверхности сезонно-охлаждающих устройств задаются $T = \text{const}$ или $(\lambda \text{ grad } T)_n = \text{const}$.

В неоднородной области моделирования с подземным льдом могут быть заложены: различные открытые поверхностные или закрытые теплые дрена; сезонно-охлаждающие устройства, которые образуют мерзлые противодиффузионные экраны (завесы).

Уравнения теплопроводности и примеси содержат конвективные слагаемые. Конвективные члены могут быть представлены в недивергентной (неконсервативной) и дивергентной (консервативной) формах. При

численном решении основное внимание уделяется вопросам аппроксимации конвективных слагаемых [4].

Исследования влияния нефтяного загрязнения на теплофизические свойства мерзлых дисперсных пород, проведенные Р.Г. Мотенко и др. [5], указывают на то, что наблюдается понижение значений коэффициентов теплопроводности загрязненных пород как в талом, так и в мерзлом состояниях, но для мерзлых пород это влияние гораздо существеннее. Для рассмотренных мерзлых пород при значениях влажности, близких к полному влагонасыщению, это снижение может составить 18–20 %, что, по-видимому, происходит из-за привнесения в породу низкотеплопроводного углеводородного компонента, теплопроводность которого значительно ниже значений теплопроводности других составляющих породы (исключая воздух). При нефтяном загрязнении не наблюдается изменение функции количества незамерзшей воды, но в зависимости от физико-химических свойств нефтепродуктов она может меняться. Подвижность загрязненного раствора определяется коэффициентом конвективной диффузии $D(T, W_b, W_l, C)$, который зависит от вязкости нефтепродуктов через диффузионные и фильтрационные свойства грунта [6]. Систему уравнений (1)–(3) расщепляем на цепочку одномерных нелинейных задач, аппроксимируем неявной схемой направленных разностей и решаем методом прогонки.

Исходные данные для численного эксперимента взяты применительно к природно-климатическим условиям г. Ленска. Динамика колебания уровня паводковой воды и её температура по многолетним метеорологическим данным приведены в таблице. В летние месяцы учитывается влияние испарения на поверхности грунта, а также поступление дождевой воды. В мае уровень поднимается на 8 м от среднезимнего уровня.

Т а б л и ц а
Колебание уровня воды (м) и ее температура (К)

A	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII -IV
B	20	7,5	7,3	7,0	7,0	4	2	2
C	3	3	1	1	1	0	0	0
D	8	5	4	4	3	1,5	1	1
E	276	283	285	281	273	271	270	270

Примечание. Буквами в таблице обозначены строки:

A – месяцы года; B – максимум уровня воды; C – минимум уровня воды; D – принятый для расчета уровень воды; E – принятая для расчета температура.

Численные расчеты тепломассообменного режима грунта проведены на участках со сплошной и островной многолетней мерзлотой. В первом случае многолетняя мерзлота является водоупором или барьером на пути вертикальной миграции нефтепродуктов. Глубина протаивания в конце мая составляет 0,5 м, снеговая вода поступает в грунт и дренирует по уклону вниз. Выход загрязненной грунтовой воды продолжается до промерзания грунта нижней террасы реки. Процесс промерзания насыщенного грунта прекращается в самый поздний срок. При этом вместе со свободной водой выходит загрязненная грунтовая вода. С другой стороны, глубина сезонного протаивания грунта нижней террасы реки незначительна (1,5÷2 м) и мерзлая завеса блокирует процесс фильтрации паводковой воды. Поэтому в случае

распространения многолетней мерзлоты фильтрацией паводковой воды можно пренебречь.

Часть территории первого причала и строительные площадки причальных сооружений попадают в район распространения островной мерзлоты («перелеток») [7]. Поэтому данный вариант численного эксперимента

отличается от предыдущего начальным распределением температуры и суммарной влажностью грунта. Динамика формирования температурного ($-1; -0,1; +2$ °C), влажностного (20; 29 %) режимов и концентрации нефтепродуктов ($0,0; 0,2; 2,0; 6,0$ кг/м³) грунта после паводка (конец мая) представлены на рисунке.

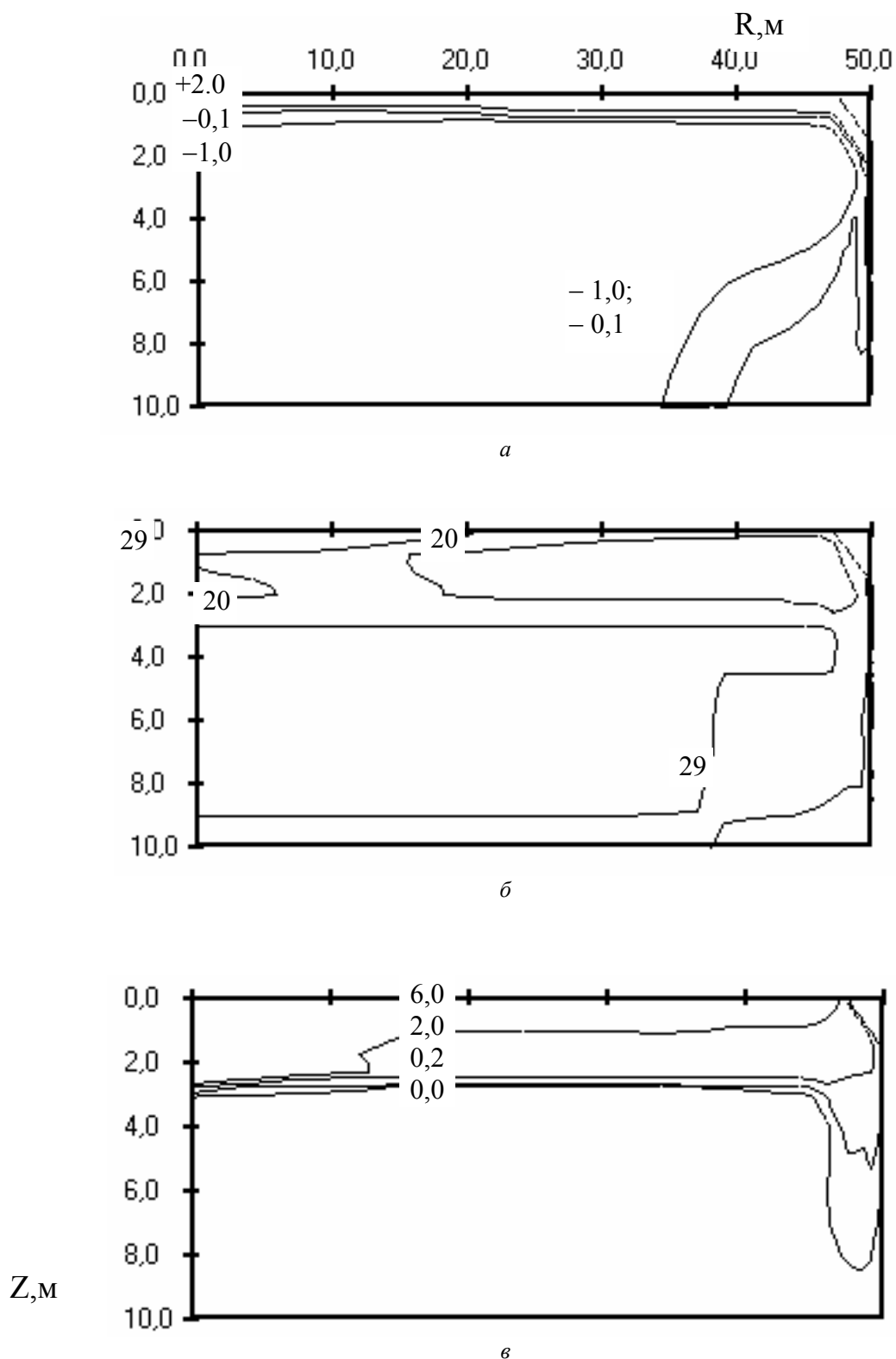


Рис. Распределения температуры (*a*), суммарной влажности (*б*) и примеси (*в*) при островной мерзлоте (май)

В зимний период при промерзании насыщенного грунта вблизи русла реки образуется ледовый «панцирь», который является противофильтрационной завесой во время весеннего паводка. Но за «панцирем» уровень грунтовой воды будет подниматься по закону сообщающихся сосудов. Во второй половине летнего сезона, после протаивания ледового «панциря», загрязненная нефтепродуктами грунтовая вода будет поступать в речной сток. Осенью процесс промерзания насыщенного грунта здесь происходит с некоторым опозданием. Поэтому вынос загрязненного раствора будет наблюдаться до промерзания грунта. Затем, в зимние месяцы происходит процесс образования нового ледового «панциря».

В годичном цикле в весенний и осенний периоды наблюдается интенсивный вынос загрязненных веществ. Весенний вынос можно объяснить следующим образом. В осенне-зимние месяцы при промерзании грунта идет процесс накопления влаги (техногенного раствора) в верхних горизонтах грунта. Весной при протаивании снега влажность верхнего слоя увеличивается, и избыточная грунтовая вода начинает дренировать по склону вниз. При этом техногенный раствор, который накопился в осенне-зимний период, вместе со снеговой водой

начинает мигрировать по склону вниз в сторону реки. В летние месяцы вынос снижается, т.к. в районах Якутии преобладает испарение. Вынос загрязненных веществ в этот период осуществляется надмерзлотными водами, которые появляются за счет позднего протаивания грунтового льда и поступления атмосферных осадков.

Влажность грунта в осенний период увеличивается за счет осенних дождей и при промерзании грунта процесс подтягивания незамерзшей воды к фронту промерзания усиливается. При этом образуется избыточное давление. За счет тепла, которое аккумулировалось в летние месяцы, в нижней части деятельного слоя грунта идет процесс протаивания. Суммарный эффект миграции грунтовых вод в результате двух вышеуказанных процессов приводит к выносу нефтепродуктов к нижней террасе реки в осенний период до полного промерзания. Результаты численного эксперимента показали, что существенную роль на вынос загрязненных веществ в речную систему играют надмерзлотные грунтовые воды.

Предложенные математические модели тепломассообмена можно применить для прогноза динамики загрязнения и оценки эффективности заградительных сооружений против паводка в промерзающих – протаивающих грунтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саввинов Д.Д., Саввинов Г.Н., Пестрякова Л.А., Пестряков Б.Н., Легостаева Я.Б. Экологические последствия весеннего паводка 2001 г. на реке Лена // Экологическая безопасность реки Лены: Материалы респ. науч. практ. конф. 23 ноября 2001 г. Якутск: Ин-т прикл. экологии Севера, 2001. С. 44–54.
2. Таргулян О. Нет «утечек» – нет энергии? Экологическая безопасность еще не стала приоритетом в энергетических отраслях // Мировая энергетическая политика. 2002. № 8. С. 74–77.
3. Казёнов С.М., Арбузов А.И., Ковалевский Ю.В. Воздействия объектов нефтепродуктообеспечения на геологическую среду // Геоэкология. 1998. № 1. С. 54–74.
4. Пермяков П.П. Численное моделирование задач конвективно-диффузионного переноса при фазовом переходе // Проблема прочности материалов и конструкций для регионов холодного климата: Тр. I-го Евразийского симпозиума. 16–20 июля 2002 г. Якутск, 2002. Ч. IV. С. 149–156.
5. Мотенко Р.Г., Чеверев В.Г., Журавлев И.И. Влияние нефтяного загрязнения на теплофизические свойства мерзлых дисперсных пород // Геофизические исследования криолитозоны. М.: НСКЗ РАН, 2000. С. 132–138.
6. Кравцова О.Н., Мальшев А.В., Старостин Е.Г., Тимофеев А.М. Экспериментальное исследование фильтрации в дисперсных средах, загрязненных нефтепродуктами // Проблема прочности материалов и машин для регионов холодного климата: Тр. I-го Евразийского симпозиума. 16–20 июля 2002 г. В 4 частях. Якутск, 2002. Ч. IV. С. 98–101.
7. Причалы Ленской нефтебазы в г. Ленск: Отчет по изыскательным работам, выполненным в 1981 году. Арх. № 1381 СП. Новосибирск: Сиб-Гипроречтранс. 1981. 110с.

Статья представлена отделом теплофизики и теплоэнергетики Института физико-технических проблем Севера (г. Якутск), поступила в научную редакцию «Кибернетика» 20 марта 2004 г.