

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛЯ МЕСТНОСТИ
НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗОН ВЗРЫВООПАСНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ
ПРИ ИСПАРЕНИИ НЕФТИ С ПОВЕРХНОСТИ АВАРИЙНОГО ПРОЛИВА**

Галеев А.Д., Поникаров С.И.

*Казанский государственный технологический университет
email:galeev_ainur@mail.ru*

Представлена модель для расчета интенсивности испарения с поверхности аварийного пролива нефти. Приведены результаты оценки влияния скорости ветра и геометрических характеристик профиля местности на динамику формирования взрывоопасного облака при испарении нефти.

Ключевые слова: аварийный пролив, испарение нефти, численное моделирование, взрывоопасное облако

Обеспечение приемлемого уровня промышленной безопасности объектов нефтяной отрасли может быть достигнуто путем прогнозирования последствий аварий на основе концепции риска. Расчет количества опасного вещества, участвующего в формировании взрывоопасного облака – один из этапов оценки риска аварий на взрывопожароопасных промышленных объектах. Для решения данной задачи необходимо знание количественных характеристик процесса испарения со свободной поверхности. Процесс испарения с поверхности аварийных разливов нефти носит нестационарный характер, обусловленный изменением со временем состава жидкой фазы, температуры, структуры потока над поверхностью разлива, движущей силы процесса испарения. Имеющиеся эмпирические корреляции и аналитические формулы не учитывают перечисленные факторы, что обуславливает необходимость совершенствования математической модели испарения.

В данной статье представлен алгоритм определения массы горючего вещества в облаке, ограниченном концентрационными пределами распространения пламени, с учетом нестационарности поступления паров в атмосферу и особенностей геометрии подстилающей поверхности

Модель базируется на численном решении трехмерных нестационарных уравнений гидродинамики и теплообмена.

Математическая модель испарения нефти

При разработке модели испарения нефти были сделаны следующие допущения:

смесь компонентов идеальна;

— взаимное влияние процессов молекулярной диффузии компонентов не учитывается (приближение независимой диффузии);

— жидкость считается перемешанной по высоте слоя;

— свободная граница жидкости при испарении считается неподвижной.

Нефть представлена дискретной смесью, состоящей из фиксированного числа условных компонентов (псевдокомпонентов), каждый из которых соответствует узкой фракции на кривой истинных температур кипения (ИТК). Разбиение смеси на псевдокомпоненты и расчет для них свойств проводились с помощью программы моделирования химико-технологических систем ChemCAD.

Концентрация пара i -го компонента на поверхности жидкости определялась, исходя из гипотезы о термодинамическом равновесии между жидкостью и ее паром у поверхности раздела. Согласно закону Рауля мольная доля пара i -го компонента на межфазной границе:

$$Y_{i,w} = X_i \frac{P_{Vi}(T_l)}{P_0}, \quad (1)$$

где $Y_{i,w}$ – мольная доля пара i -й примеси на границе раздела фаз; X_i – мольная доля компонента в жидкой фазе; $P_{Vi}(T_l)$ – давление насыщенных паров i -го компонента жидкости при температуре T_p , Па; T_l – температура жидкой фазы, К; P_0 – давление в окружающей среде, Па.

Зависимость давления насыщенных паров компонентов жидкости от температуры аппроксимировалась уравнением согласно данным, полученным с помощью программы ChemCAD:

$$P_{Vi}(T_l) = A_i \cdot T_l^4 + B_i \cdot T_l^3 + C_i \cdot T_l^2 + D_i \cdot T_l + E_i, \quad (2)$$

где A_i, B_i, C_i, D_i, E_i – коэффициенты.

Массовый поток i -го компонента с поверхности разлития определялся на основе стандартных функций стенки [1] с учетом поправки на стефановский

поток (конвективный поток парогазовой смеси, индуцируемый диффузионным потоком компонентов при непроницаемой поверхности раздела фаз, и направленный от поверхности жидкости в парогазовую среду):

$$J_{i,w} = \frac{1}{K_s} \frac{(C_{i,w} - C_{i,P})\rho u_*}{C^+}; \quad (3)$$

$$C^+ = \begin{cases} Sc_i y^+ & \text{при } y^+ < y_C^+ \\ Sc_i (u^+ + P_C) & \text{при } y^+ > y_C^+ \end{cases}; \quad (4)$$

$$y^+ = \frac{\rho u_* y_P}{\mu}; \quad (5)$$

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) - \Delta B; \quad (6)$$

$$\Delta B = \begin{cases} 0 & \text{при } z_{0l}^+ < 2,25 \\ \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z_{0l}^+ - 2,25}{87,75} + C_Z \cdot z_{0l}^+ \right) \cdot \sin\{0,4258 \cdot (\ln z_{0l}^+ - 0,811)\} & \text{при } 2,25 < z_{0l}^+ < 90 \\ \frac{1}{\kappa} \ln(1 + C_Z \cdot z_{0l}^+) & \text{при } z_{0l}^+ > 90 \end{cases} \quad (7)$$

$$z_{0l}^+ = \frac{\rho \cdot z_{0l} \cdot u_*}{\mu}; \quad (8)$$

$$P_C = 9,24 \left[\left(\frac{Sc_i}{Sc_t} \right)^{3/4} - 1 \right] \left[1 + 0,28 e^{-0,007 Sc_i / Sc_t} \right]; \quad (9)$$

$$K_s = 1 - \sum Y_{i,w}, \quad (10)$$

где $J_{i,w}$ – массовый поток i -го компонента с поверхности аварийного пролива, кг/(м²с); K_s – коэффициент, учитывающий влияние на интенсивность испарения стефановского потока; $C_{i,w}$ – массовая концентрация i -й примеси на границе раздела фаз, кг/кг; $C_{i,P}$ – концентрация i -й примеси в пристеночном узле расчетной сетки, кг/кг; ρ – плотность паровоздушной смеси, кг/м³; u_* – скорость трения; $u_* = (\tau_w/\rho)^{0,5}$; τ_w – напряжение трения на стенке; Sc_i и Sc_t – молекулярное и турбулентное числа Шмидта соответственно; y_P – расстояние по нормали от поверхности испарения (стенки) до соседнего узла расчетной сетки; μ – коэффициент моле-

кулярной динамической вязкости; k – константа Кармана, равная 0,41; E – константа в логарифмическом законе стенки для скорости, равная 9,1; y_c^+ – безразмерное расстояние от стенки, определяемое в точке пересечения линейного и логарифмического закона изменения концентрации у стенки; C_z – коэффициент; z_{0l} – высота шероховатости поверхности пролива.

Вывод уравнения (10) для расчета поправки на стефановский поток представлен в работе [2].

Определенные таким образом интенсивности поступления паров $J_{i,w}$ использовались в качестве граничных условий в области источника в задаче распространения взрывоопасных компонентов в атмосфере, включающей численное решение полной системы трехмерных нестационарных уравнений Рейнольдса, замыкаемых стандартной k - ϵ моделью турбулентности. Для дискретизации дифференциальных уравнений применялся метод контрольного объема, реализованный в пакете FLUENT.

Плотность газовой смеси (кг/м^3) определяется по уравнению состояния идеального газа с учетом влияния массовых концентраций компонентов:

$$\rho = \frac{P_0}{R_0 \cdot T \cdot \sum C_i / M_i}, \quad (11)$$

где T – температура паровоздушной смеси, К; C_i – массовая доля i -го компонента в смеси; M_i – молекулярная масса i -го компонента, кг/моль . R_0 – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{моль})$

Граничные профили скорости и турбулентных характеристик на входе в расчетную область (рис. 1) определялись из численного решения задачи движения воздушного потока над ровной поверхностью.

Изменение температуры жидкости рассчитывалось из уравнения теплового баланса:

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{q_a + q_n - q_r}{\sum m_{li} C_{pli}}, \quad (12)$$

где τ – время, с; q_a – тепловой поток из атмосферы, Вт/м^2 ; q_n – поток тепла от грунта к жидкости, Вт/м^2 ; q_r – теплота, отводимая от жидкости при испарении,

Вт/м²; m_{li} – масса i -го компонента жидкости, отнесенная к единице площади поверхности пролива, кг/м²; C_{pli} – удельная теплоемкость i -го компонента жидкости, Дж/(кг·К).

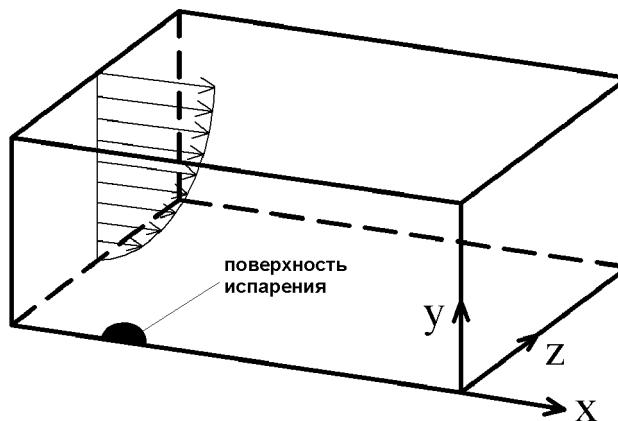


Рисунок 1. Расчетная область

Тепловой поток, подводимый от грунта к жидкой фазе, $q_n = \lambda(\partial T/\partial y)_{y=0}$ определялся из численного решения трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности для твердого подстилающего слоя:

$$C_n \rho_n \frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \lambda_n \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right). \quad (13)$$

где $T_n(x,y,z)$ – распределение температур в слое грунта; C_n , ρ_n , λ_n – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности грунта соответственно.

При решении уравнения (13) на твердой поверхности, прилегающей к проливу, задавалось условие $T_n = T_l$.

Тепловой поток из атмосферы q_a вычислялся с помощью пристеночных функций, описание которых приведено в работе [2].

Теплота, отводимая от жидкости при испарении, Вт/м²:

$$q_r = \sum \Delta H_i \cdot J_{i,w}, \quad (14)$$

где ΔH_i – теплота испарения i -го компонента жидкой фазы, Дж/кг.

Изменение массы i -го компонента в жидкой фазе описывается уравнением:

$$\frac{dm_{li}}{dt} = -J_{i,w}. \quad (15)$$

В рассматриваемой задаче удельная теплоемкость, коэффициент молекулярной вязкости и теплопроводности паровоздушной смеси определялись через массовые доли и удельные теплоемкости, коэффициенты молекулярной вязкости и теплопроводности чистых компонентов:

$$\phi = \sum C_i \cdot \phi_i, \quad (16)$$

где ϕ и ϕ_i – физические свойства соответственно смеси и ее i -го компонента.

Коэффициенты молекулярной диффузии компонентов в воздухе вычислялись по формуле [3]:

$$D_{mi} = \frac{10^{-7} T^{1,75}}{P(v_i^{1/3} + v_a^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_a}}, \quad (17)$$

где T – температура, К; P – давление, атм; M – молекулярная масса газа; v – молекулярный объем газа, определяемый как сумма атомных объемов элементов, входящих в состав газа.

Индексы i и a в формуле (17) относятся к компоненту пара и воздуху соответственно. Количество атомов углерода и водорода в суммарной формуле псевдокомпонента определялось по значению средней молекулярной массы.

Результаты численных расчетов

Исследовано влияние геометрии подстилающей поверхности и параметров набегающего потока на динамику испарения нефти и рассеяние взрывоопасных паров в атмосфере.

Кривая ИТК исследуемой нефти представлена на рис. 2.

Для расчета принимался следующий состав нефти (% масс.): пропан – 0,53; н-бутан – 1,0; изобутан – 0,27; н-пентан – 0,87; изопентан – 0,73; ТК42 – 0,7; ТК54 – 1,2; ТК70 – 1,51; ТК90 – 2,9; ТК110 – 3,28; ТК130 – 3,1; ТК150 – 3,4; ТК170 – 4,1; ТК210 – 9,3; ТК280 – 15,13; ТК360 – 13,26; ТК450 – 16,66; ТК594 – 22,03.

Примечание. Аббревиатура ТК... обозначает среднюю температуру кипения узкой фракции.

При моделировании рассматривались ситуации разлива нефти, как на ровной поверхности, так и по дну выемки. Профиль выемки приведен на рис. 3. Принималось отношение размеров $l:h$, равное 11 и 3,5, что соответствует углам накло-

на склонов $\alpha = 5,8$ и $17,7^\circ$ соответственно. Данные профили достаточно широко распространены среди естественных форм рельефа. Рассматриваемая аварийная ситуация возможна при разгерметизации магистрального нефтепровода, пересечения которого с оврагами и балками являются одними из самых сложных участков.

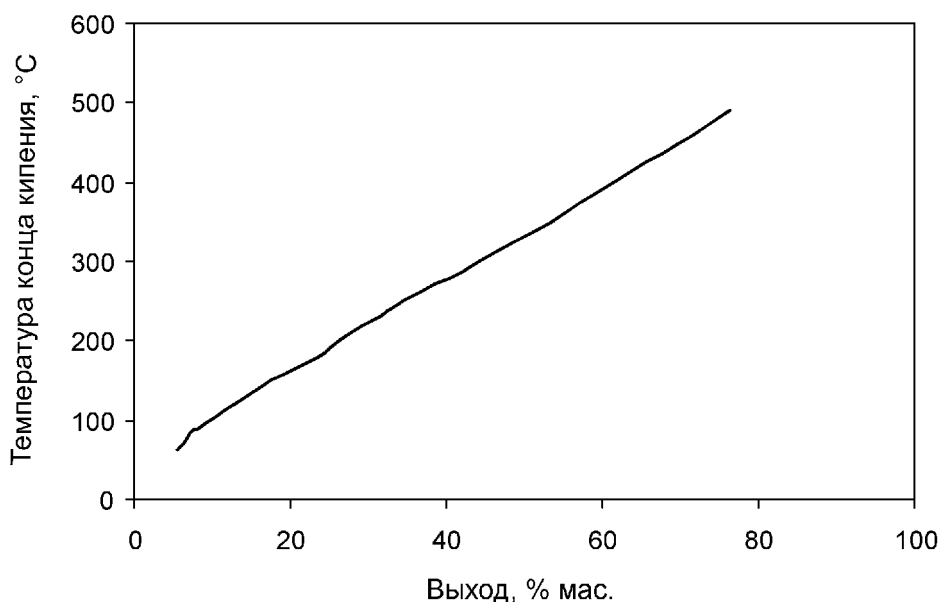


Рис. 2. Кривая ИТК туймазинской нефти [4]



Рис. 3. Профиль выемки

Температура окружающей среды задавалась равной 20°C . Состояние атмосферы – изотермия. Моделирование проводилось для двух значений скорости ветрового потока – 1 и 2 м/с (на высоте 10 м).

Длительность испарения жидкости принималась равной 3600 с [5].

Другие параметры, остававшиеся постоянными, имели следующие значения: высота шероховатости твердой поверхности $z_0 = z_{0l} = 0,01$ м, $\lambda_n = 0,97$ Вт/(м·К), $C_n = 840$ Дж/(кг·К), $\rho_n = 1380$ кг/м³.

Начальная температура жидкости принималась равной температуре окружающей среды.

Проводилось сравнение результатов расчетов скорости испарения, полученных с использованием разработанной методики и полуэмпирического уравнения [6]:

$$\frac{dm_{li}}{dt} = - \frac{k_i \cdot M_i \cdot P_{ni}(T_l)}{R_0 \cdot T_l} X_i, \quad (18)$$

где k – коэффициент массоотдачи, м/с; M_i – молекулярная масса i -го компонента, кг/моль.

Коэффициент массоотдачи k рассчитывается по формуле [7]:

$$k = 17,231 \cdot U_{10}^{0,78} \cdot D^{-0,11} \cdot Sc_i^{-0,67}, \quad (19)$$

где U_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, м/с; D – диаметр пролива, м.

Для сравнения проводился расчет без учета изменения со временем состава жидкости по формуле:

$$m_{исп}(\tau) = \frac{1}{R_0 \cdot T_{l0}} \sum_{i=1}^N k_i \cdot M_i \cdot P_{ni}(T_{l0}) \cdot X_{i0} \cdot \tau, \quad (20)$$

где $m_{исп}(\tau)$ – удельная масса жидкости, испарившейся за рассматриваемый промежуток времени τ ; N – количество компонентов смеси; T_{l0} – начальная температура жидкости, К; X_{i0} – мольная доля i -го компонента в жидкой фазе в начальный момент времени.

Неровность и неоднородность подстилающей поверхности оказывает существенное влияние на трансформацию потока, обтекающего эту поверхность, и соответственно на процессы испарения и рассеяния примесей в пограничном слое атмосферы. В качестве критерия оценки этого влияния выступает коэффициент трансформации [8]:

$$\beta = \frac{U_P}{U_0}, \quad (21)$$

где U_p – скорость потока в точке P на некоторой высоте y (принималась равной расстоянию от твердой поверхности до соседнего узла расчетной сетки $y = 0,1$ м); U_0 – скорость потока в точке P на некоторой высоте y без учета влияния неровностей поверхности.

При рассматриваемых углах наклонов склонов отрывные зоны не образовывались. На дне выемки наблюдается торможение потока. При скорости ветра 1 м/с коэффициент β на дне выемки составил 0,758 и 0,391, при скорости ветра 2 м/с – 0,756 и 0,386 при углах наклона склона выемки $\alpha = 5,8^\circ$ и $17,7^\circ$ соответственно.

На рис. 4 представлены зависимости удельной массы испарившейся жидкости $m_{исп}$ от времени испарения τ , рассчитанные с использованием уравнения (18) и разработанной модели.

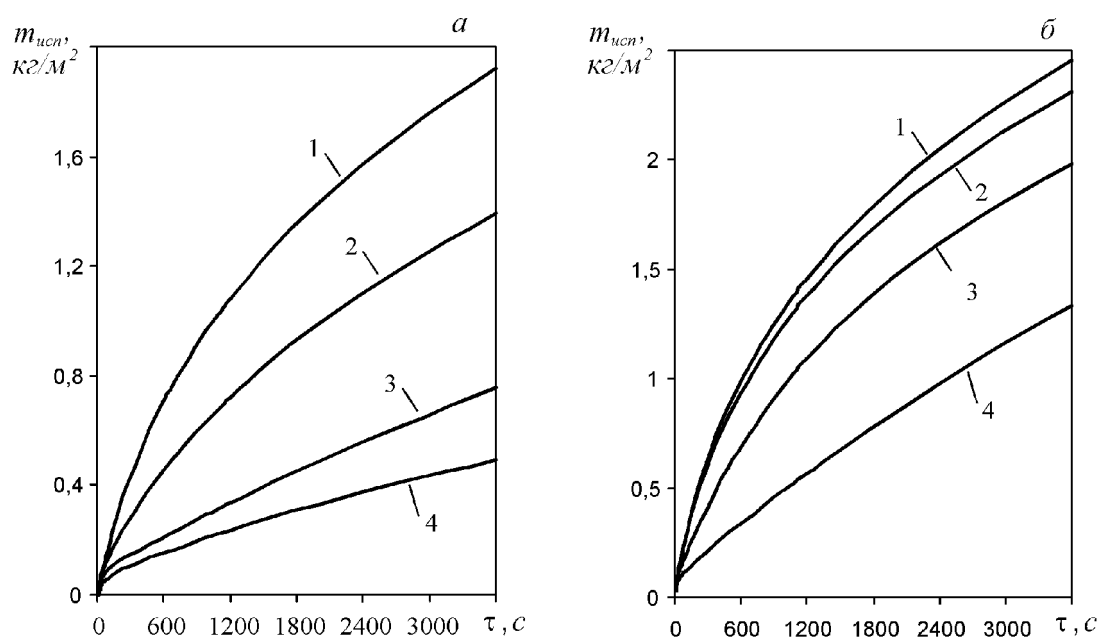


Рисунок 4. Зависимость удельной массы испарившейся жидкости $m_{исп}$

от времени τ при скорости ветра 1 м/с (а) и 2 м/с (б):

- 1 – расчет по уравнению (18); 2 – численная модель при $h = 0$ м;
3 – численная модель при $l/h = 11$; 4 – численная модель при $l/h = 3,5$

Значение $m_{исп}$ за время 3600 с, рассчитанное по формуле (20) с использованием постоянного значения давления насыщенных паров, составило $10,29$ кг/м² и

17,64 кг/м² для скорости ветра 1 и 2 м/с соответственно, что в 7,4 и 7,9 раз превышает значения, полученные по численной модели для ровной поверхности. Данные результаты демонстрируют важность учета изменения состава жидкой фазы при испарении с поверхности аварийных проливов нефти малой толщины.

Значения $m_{\text{исп}}$, вычисленные по формуле (18) и по численной модели существенно отличаются (кроме варианта: скорость ветра – 2 м/с, характер местности - равнина). Различие тем больше, чем ниже скорость набегающего потока и больше угол наклона склона α . Это обусловлено тем, что уравнение (18) не учитывает изменение гидродинамических характеристик потока над поверхностью разлива в результате образования паровоздушной смеси с плотностью, отличающейся от плотности воздуха.

Из данных рис. 4 видно, что интенсивность испарения нефти существенно зависит от величины угла α . Так, при скорости ветра 1 м/с количество испарившейся жидкости, рассчитанное без учета рельефа местности, на 84 % превышает значение, полученное при $\alpha = 5,8^\circ$ и на 183 % – при $\alpha = 17,7^\circ$. При скорости ветра 2 м/с и угле $\alpha = 5,8^\circ$ значение удельной массы испарившейся нефти ниже значения, полученного для ровной поверхности, на 16,5 %, при $\alpha = 17,7^\circ$ – на 73 %. Снижение интенсивности испарения при увеличении угла наклона склона обусловлено как снижением скорости потока на дне выемки вследствие изменения кривизны поверхности (определяемого коэффициентом трансформации β), так и влиянием сил плавучести. Последний фактор оказывает основное влияние на динамику испарения. Склон препятствует перемещению тяжелого газа по направлению ветра, способствуя его накоплению над поверхностью пролива. Возникающий отрицательный вертикальный градиент плотности вызывает подавление турбулентности в облаке (устойчивая стратификация), что приводит к снижению интенсивности испарения. К тому же при высокой плотности облака влияние внешнего воздушного потока на поле скоростей в облаке ослабевает, что, в свою очередь, сопровождается накоплением примесей и падением движущей силы процесса диффузии.

Горючие пары, смешиваясь с воздухом, образуют взрывоопасные смеси. Обозначим массу газа в объеме, ограниченном НКПР, как m_b , а отношение m_b к

общему количеству испарившейся жидкости как Z . Значение НКПР принималось равным 1 % (об.).

Нестационарное воздействие источника является причиной изменения $m_{\text{в}}$ с течением времени (рис. 5). Величина $m_{\text{в}}$ сначала увеличивается, достигает максимума, а затем снижается. Такая зависимость обусловлена изменением содержания в жидкой фазе легколетучих компонентов. Для обоих значений скорости ветра максимальное значение $m_{\text{в}}$ значительно снижается при увеличении угла наклона склона выемки. При скорости ветра 1 м/с и угле наклона $\alpha = 5,8^\circ$ максимальное значение $m_{\text{в}}$ ниже соответствующего значения на ровной поверхности в 3 раза, при $\alpha = 17,7^\circ$ – в 3,5 раза. При скорости ветра 2 м/с и угле наклона $\alpha = 5,8^\circ$ максимальное значение $m_{\text{в}}$ ниже соответствующего значения на ровной поверхности в 2 раза, при $\alpha = 17,7^\circ$ – в 4 раза. Это объясняется тем, что при расположении источника в выемке интенсивность поступления паров ниже. К тому же, в начальный период испарения перепад высот способствует увеличению доли паров, разбавленных до безопасных концентраций. Склон препятствует продольному переносу пара, что приводит к резкому понижению концентрации за источником. Происходит перенос примесей с внешних слоев облака, где их концентрация невысока. В связи с этим доля паров, разбавленных до безопасных концентраций, становится выше. На рис. 6 и 7 представлены расчетные поля суммарных мольных концентраций углеводородов, ограниченных значением НКПР. Протяженность зоны взрывоопасных концентраций в направлении ветра при наличии склонов значительно снижается.

На рис. 8 представлена зависимость относительного количества газа, способного участвовать в горении, Z от продолжительности испарения. Естественно, что значения Z ниже при более высокой скорости ветра вследствие более интенсивного рассеяния примесей. На ранних стадиях испарения, при обоих значениях скорости величина Z ниже в случае расположения источника в выемке.

При скорости ветра 1 м/с наиболее опасной выглядит ситуация разлива нефти на ровной поверхности. Значения массы паров во взрывоопасных пределах в данном случае будут выше, чем при учете рельефа местности на протяжении практически всего рассматриваемого промежутка времени.

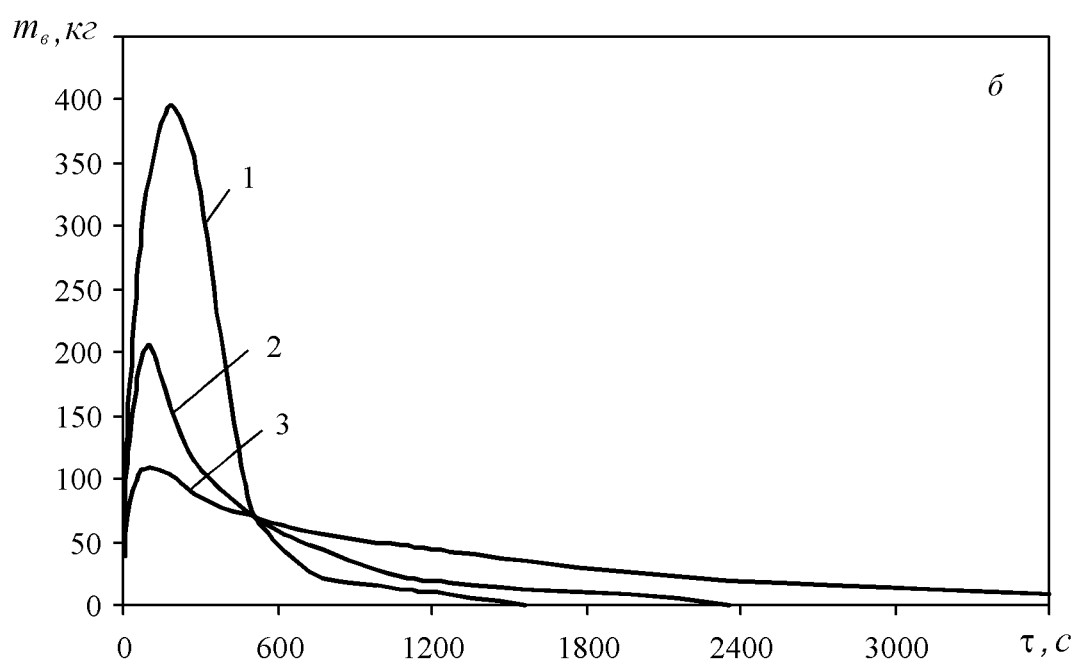
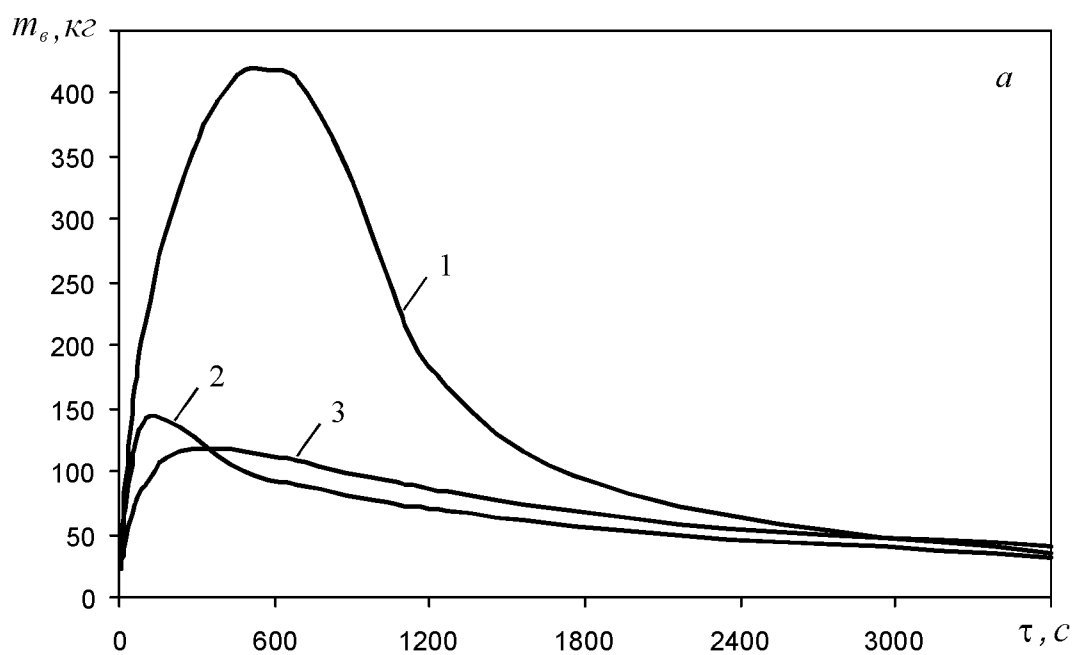


Рисунок 5. Зависимость массы пара во взрывоопасных пределах m_g от времени τ при скоростях ветра 1 м/с (а) и 2 м/с (б):
1 – ровная поверхность; 2 – $l/h = 11$; 3 – $l/h = 3,5$

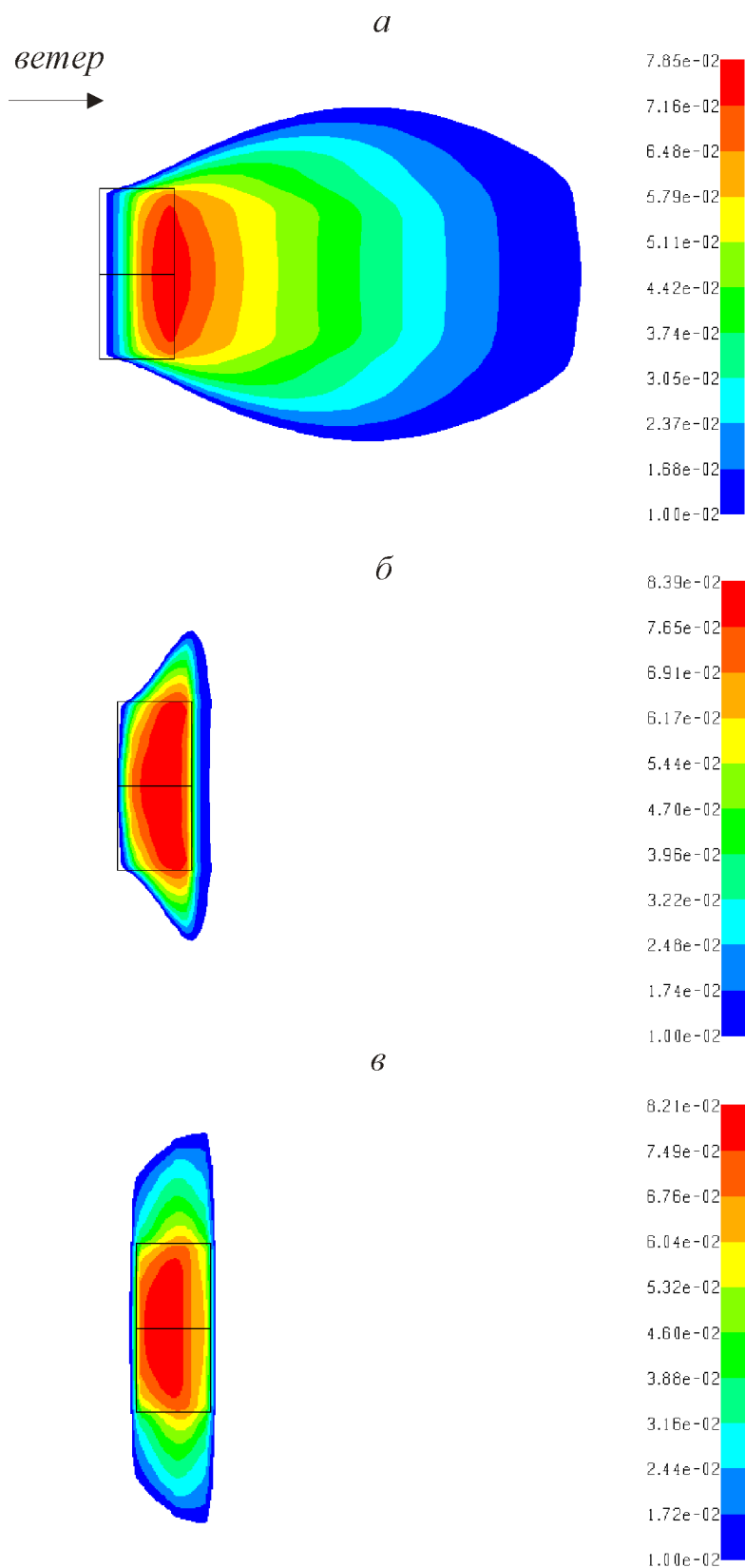


Рисунок 6. Расчетное поле суммарных молярных концентраций углеводородов при скорости ветра 1 м/с и $\tau = 480$ с: а) ровная поверхность; б) $l/h = 11$; в) $l/h = 3,5$

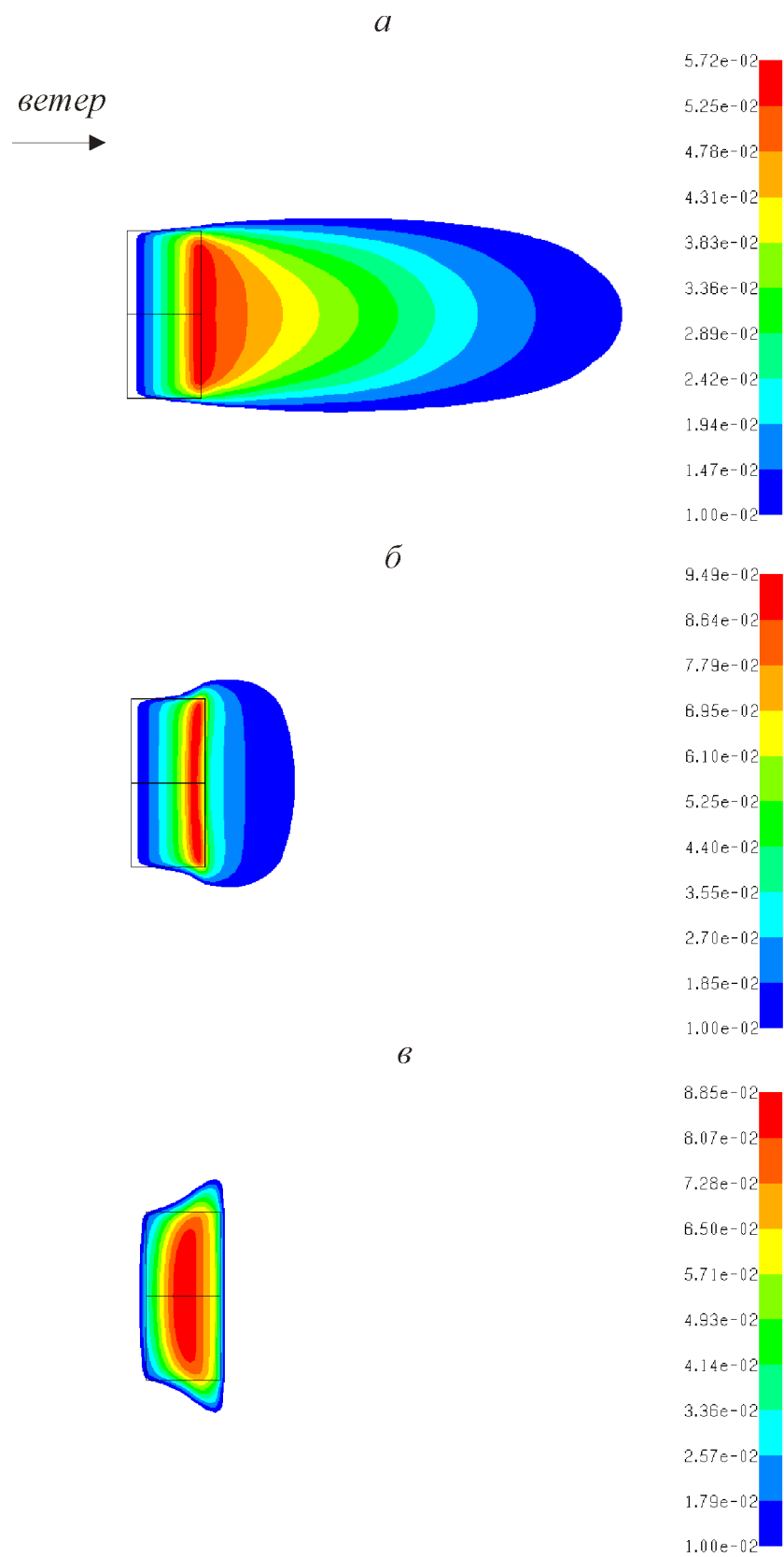


Рисунок 7. Расчетное поле суммарных мольных концентраций углеводородов при скорости ветра 2 м/с и $\tau = 280$ с: а) ровная поверхность; б) $l/h = 11$; в) $l/h = 3,5$

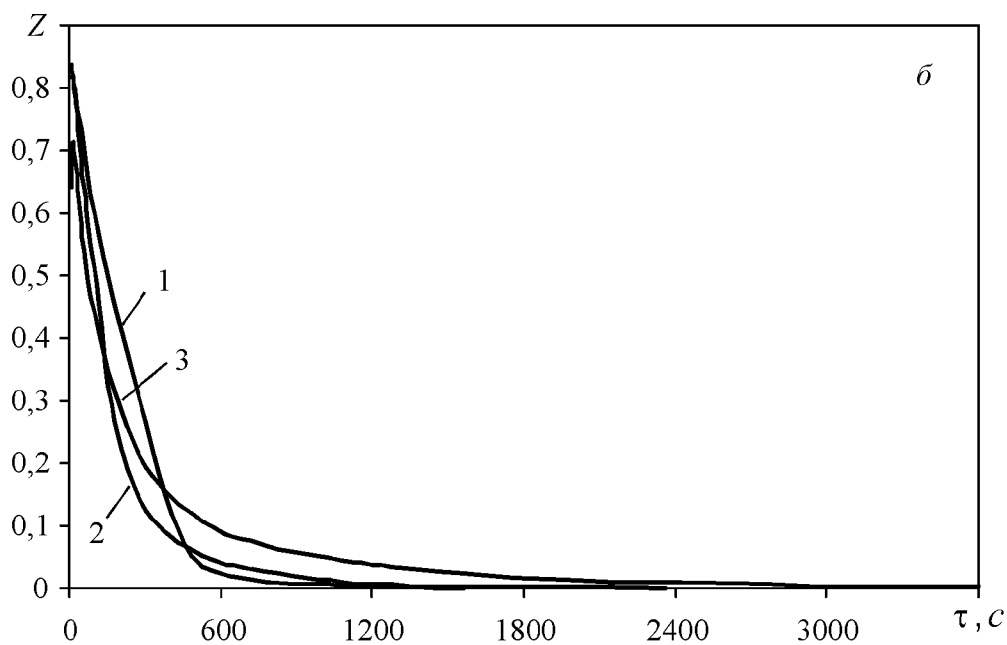
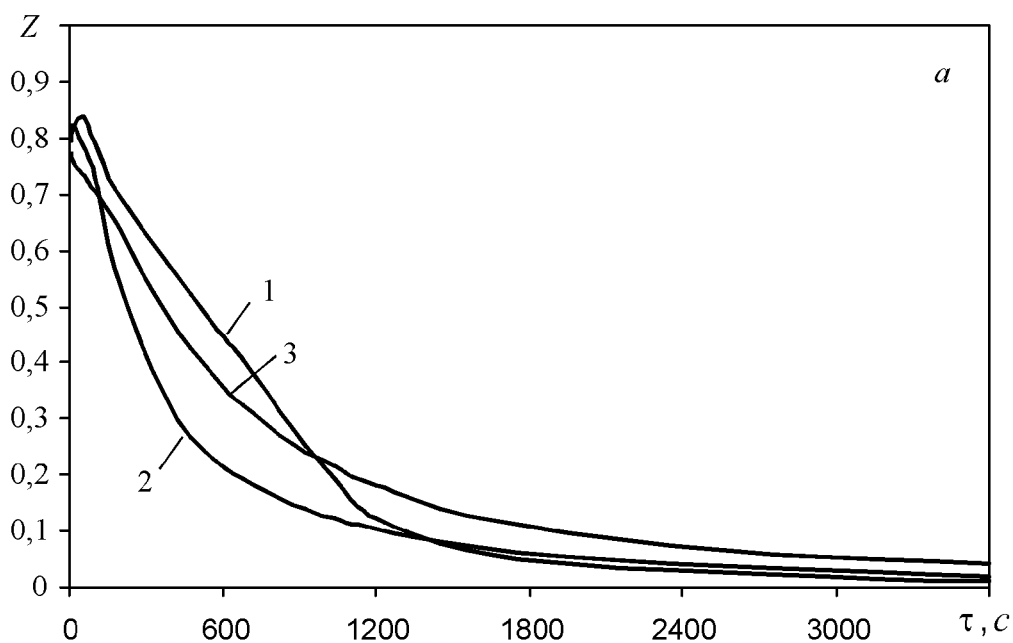


Рисунок 8. Зависимость относительного количества газа, способного участвовать в горении, Z от времени τ при скоростях ветра 1 м/с (а) и 2 м/с (б):
1 – ровная поверхность; 2 – $l/h = 11$; 3 – $l/h = 3,5$

При скорости ветра 2 м/с трудно однозначно определить наиболее неблагоприятные условия для развития аварии. Максимальное значение m_g выше в случае ровной поверхности. Однако со временем снижение m_g происходит более резко, чем при расположении пролива в выемке, и по истечении 25 минут взрывоопасные концентрации не образуются. Аккумуляирование паров при расположении источника на дне выемки обуславливает сохранение опасных концентраций в течение более длительного времени, чем в случае отсутствия перепада высот.

Результаты численных экспериментов показали, что для рассмотренного случая аварии выбор скорости ветра 1 м/с позволяет консервативно оценивать массу пара во взрывоопасных пределах, то есть получать значения вблизи верхней границы возможных величин.

Заключение

На базе трехмерных нестационарных уравнений гидродинамики и тепло-массообмена получен комплекс моделей для оценки интенсивности испарения с зеркала разлива нефти и определения количества паров в облаке, ограниченном концентрационными пределами распространения пламени. Проведен численный анализ влияния профиля подстилающей поверхности на динамику формирования взрывоопасного облака при различных значениях скорости ветра.

Литература

1. Fluent Inc. Fluent 6.1. User's Guide, Lebanon, 2003.
2. Галеев А.Д., Поникаров С.И. Прогнозирование зон токсической опасности и пожаровзрывоопасности при авариях на объектах хранения нефтепродуктов // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 5. – С. 29–34.
3. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие. – Л. : Химия, 1982. – 592 с.
4. Рудин М.Г., Сомов В.Е., Фомин А.С. Карманный справочник нефтестроителя. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2004. – 336 с.

5. НПБ 105–03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности: утв. Приказом МЧС РФ от 18 июня 2003 г. № 314.

Reed M., Gundlach E., Kana T.A. A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies // *Oil and Chemical Pollution*. – 1989. – № 5. – pp.441–449.

Kawamura P. I., Mackay D. The evaporation of volatile liquids // *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 15. – 1987. – pp. 343–364.

Микрюков А.В. Численное моделирование распространения примесей от источников загрязнения с учетом рельефа местности//Дис. канд. физ.-мат. наук. – Ижевск, 2004. – 181 с.