

*И.А. Чуб, д.т.н., профессор, нач. каф., НУГЗУ,  
В.А. Андронов, д.т.н., профессор, проректор, НУГЗУ,  
А.А. Неронов, оперативный дежурный, НУГЗУ,  
С.Э. Важинский, к.т.н., доцент, НУГЗУ*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ИСПАРЕНИЯ НА ОБЪЕМ ПОТЕРЬ НЕФТИ ПРИ АВАРИЯХ НА ТРУБОПРОВОДАХ**

Определяется зависимость потерь на испарение в атмосферу при аварийном разливе нефти с учетом скорости ветра и температуры окружающей среды.

**Ключевые слова:** аварийный разлив нефти, потери нефти на испарение, температура, скорость ветра.

**Постановка проблемы.** Использование современных технологий добычи, хранения, транспортировки нефти и строгое соблюдение требований безопасности не гарантируют отсутствие чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с аварийными разливами нефти (АРН). Эти аварии приводят, как правило, к тяжелым экологическим последствиям и значительным экономическим потерям. Успешной ликвидации таких ЧС и оценке ущерба, нанесенного окружающей среде, препятствует недостаточная разработка эффективных методов оценки параметров АРН. Решение указанных проблем возможно на основе применения математического моделирования, направленного на разработку моделей потерь нефти на испарение в атмосферу.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В ряде публикаций [1–3] рассматриваются различные вопросы анализа и моделирования потерь нефти при АРН на суше. Недостатками указанных подходов является общий характер рекомендаций без учета физических характеристик нефти, влияющих на формирование и динамику нефтяного пятна и уровень потерь нефти на испарение.

**Постановка задачи и ее решение.** В соответствии с вышесказанным, *целью статьи* является моделирование величины потерь при АРН с учетом процессов испарения нефти и сбора разлившейся нефти в зависимости от характеристик нефти и параметров окружающей среды. Для упрощения анализа рассматривается случай истечения нефти на горизонтальный участок, однако результаты моделирования справедливы и для областей с рельефом.

Рассмотрим аварию, связанную с частичным разрушением нефтепровода (прокол), сопровождающуюся непрерывным истечением нефти на сушу и возникновением области загрязнения.

Как показано в работах [3, 4], оценка величины потерь при АРН

находиться в три етапа:

- определение объема аварийного истечения нефти из дефектного трубопровода;
- определение площади нефтяного пятна с учетом характеристик нефти и времени растекания;
- определение потерь нефти на испарение с учетом характеристик нефти, параметров окружающей среды и времени испарения.

Вычисление объема истечения нефти из дефектного трубопровода при АРН производится суммированием количеств вытекшей нефти при различных режимах истечения.

Способы определения объемов аварийного истечения нефти из трубопровода при различных режимах были проанализированы в работах [4, 5].

Площадь растекания нефти по грунту при АРН находится с учетом объема и времени разлива, свойств нефти и грунта. Методы оценки площади разлива подробно даны в работах [6, 7].

При разливе нефти по горизонтальной твердой подстилающей поверхности зона загрязнения имеет форму, близкую к круговой. Формула для вычисления площади  $S_{PA3Л}$  аварийного нефтяного пятна на момент времени  $t$  после аварии при непрерывном истечении с объемным расходом  $Q = \text{const}$  имеет вид [6, 7]:

$$S_{PA3Л} = 36 Q^{0.764} \nu^{-0.367} t^{0.918}, \quad (1)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости нефти, Ст;  $t$  – время растекания нефтяного пятна, с.

Здесь время растекания равно промежутку времени с момента прорыва до ликвидации течи в трубопроводе.

В случае, если  $Q = Q(t)$ , площадь нефтяного пятна при АНР определяется как

$$S_{PA3Л} = 36 \int_0^T Q(t)^{0.764} \nu^{-0.367} t^{0.918} dt, \quad (2)$$

где  $T$  – общее время растекания нефти.

В статье [8] были определены потери нефти на испарение в атмосферу. Объем  $V_{И}$ , легких фракций нефти, испарившихся в атмосферу, может быть найден по формуле

$$V_{И} = \frac{1}{\rho} W_{И} S_{PA3Л} t, \quad (3)$$

где  $W_{И}$  – интенсивность испарения, кг / с  $m^2$ ,  $t$  – время испарения, с. Здесь

время испарения равно общему времени локализации и ликвидации АРН.

Для оценки величины  $W_{II}$  в работе [5] предлагается использовать формулу

$$W_{II} = 10^{-6} \eta \sqrt{M_{II} P_H}, \quad (4)$$

где  $M_{II}$  – молярная масса паров нефти, г/моль;  $P_H$  – давление насыщенных паров нефти, кПа;  $\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость ветра и температуру окружающей среды над поверхностью испарения (табл. 1).

**Табл. 1. Значения коэффициента  $\eta$  в зависимости от скорости ветра и температуры окружающей среды над поверхностью испарения**

Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С				
	ниже 12	12 – 17	17 – 25	25 – 32	выше 32
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0 – 0,15	3,0	2,6	2,4	1,8	1,8
0,15 – 0,30	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,30 – 0,70	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
больше 0,70	10	8,7	7,7	5,6	4,6

Тогда, с учетом (4), выражение (3) примет вид:

$$V_{II} = 10^{-6} \frac{\sqrt[3]{M_{II} P_H}}{\rho} S_{PA3Л} t. \quad (5)$$

Для различных участков пятна разлива время испарения различно и определяется общим временем растекания  $T$  и временем достижения и покрытия  $t_{ДОСТ}$  нефтяным потоком данного участка:

$$t_{\phi} = t - t_{ДОСТ}. \quad (6)$$

Для определения величины  $t_{ДОСТ}$ , аналогично тому, как показано в работе [6], разобьем нефтяное пятно на элементарные площадки  $S_i$ , соответствующие дискретным моментам времени  $\Delta t$ . В этом случае времен испарения  $t_i$  для  $i$ -ой элементарной площадки равно:

$$t_i = t - i \Delta t, \quad (7)$$

а площадь  $S_i$   $i$ -ой элементарной площадки определяется как

$$S_i = S(t_i) - S(t_{i-1}), \quad (8)$$

где площади испарения  $S(t_i)$  и  $S(t_{i-1})$  определяются по формуле (1) или формуле (2).

Тогда величина общего объема  $V_{II}$  испарившейся нефти имеет вид:

$$V_{II} = \sum_{i=1}^N V_{iII} = 10^{-6} \frac{\sqrt[3]{M_{II} P_H}}{\rho} \sum_{i=1}^N S_i t_i, \quad (9)$$

где  $V_{iII}$  – объем нефти, испарившейся с  $i$ -ой элементарной площадки.

После обнаружения утечки нефти из трубопровода и прибытия к месту АРН аварийно-ремонтной бригады выполняются работы по устранению течи (конкретизация времени разлива  $t$ ) и локализации разлива (конкретизация  $S_{РАЗЛ}$ ). Одновременно с устранением течи и локализацией разлива осуществляется сбор нефти с грунта, что уменьшает ее потери. Эффективность этого процесса характеризуется коэффициентом сбора нефти [6, 9]:

$$K_{CB} = \frac{V - V_{ПОТ}}{V}, \quad (10)$$

где  $V_{ПОТ}$  – общий объем потерь нефти.

Очевидно, что испарившаяся в атмосферу нефть является безвозвратно потерянной, поэтому верхней оценкой  $K_{CB}$  (без учета потерь нефти на впитывание в грунт) является величина

$$K_{CB}^* = \frac{V - V_{II}}{V},$$

полученная в предположении, что вся не испарившаяся нефть будет собрана. Величина  $K_{CB}^*$  зависит от вязкости и температуры нефти, а также скорости ветра и температуры окружающей среды, и колеблется от 0.1 до 0.8. Тогда общие потери нефти при аварии равны:

$$V_{ПОТ} = V(1 - K_{CB}). \quad (11)$$

На рис. 1 и 2 приведены зависимости  $V_{ПОТ}$  от температуры воздуха и скорости ветра, построенные по формулам (9)–(11).

Расчеты выполнялись со следующими исходными данными:

- расход нефти через дефектное отверстие  $0.01 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- время истечения нефти  $1200 \text{ с}$ ;
- плотность нефти  $840 \text{ кг/м}^3$ ;
- молярная масса паров нефти  $270 \text{ г/моль}$ ;
- давление насыщенных паров нефти  $72 \text{ кПа}$ ;
- часть собранной нефти  $50\%$

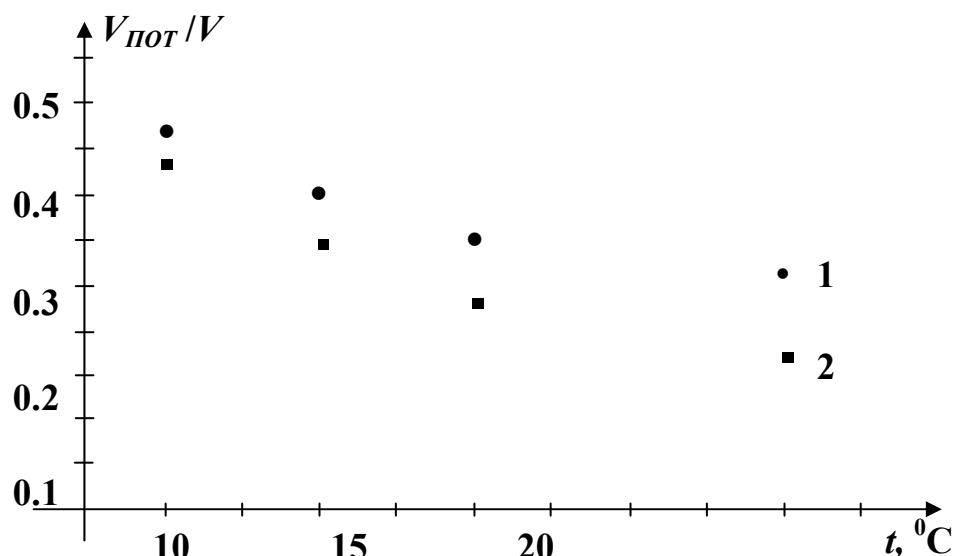


Рис. 1. Зависимость  $V_{ПOT}$  от температуры при разной скорости ветра: кривая 1 –  $v=0.5$  м/с; кривая 2 –  $v=1.0$  м/с

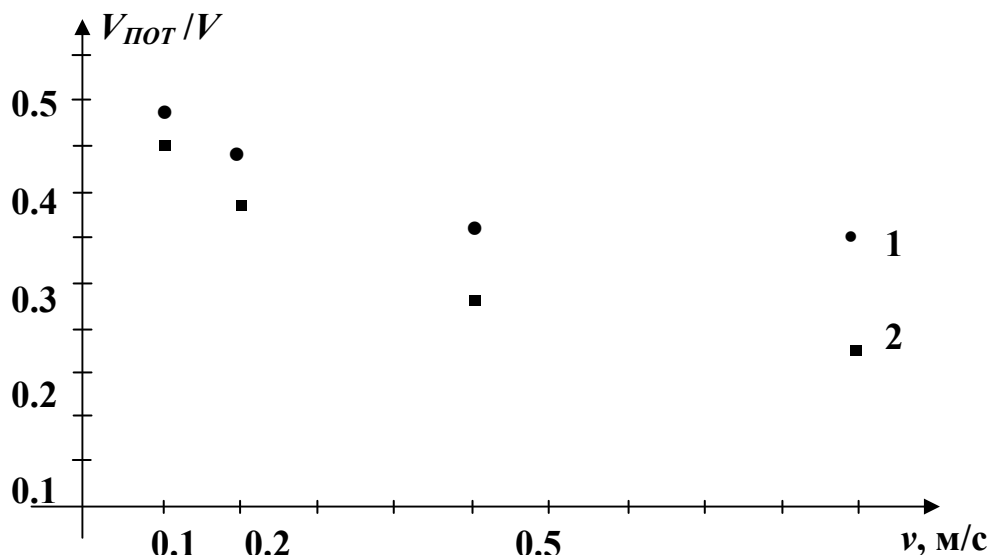


Рис. 2. Зависимость  $V_{ПOT}$  от скорости ветра при разной температуре: кривая 1 –  $t=10$ °C; кривая 2 –  $t=30$ °C

**Выводы.** Таким образом, в статье определены величины потерь нефти при аварийном разливе с учетом испарения легких фракций в атмосферу и сбора разлившейся нефти. Потери возрастают с увеличением температуры окружающей среды и скорости ветра над поверхностью разлива.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атнабаев А.Ф. Оценка последствий аварийных разливов нефти на магистральных нефтепроводах / А.Ф. Атнабаев, С.В. Павлов и др. // Нефтегазовое дело. – 2006. – №1. – С. 239-242.

2. Широков Г.В. Анализ рисков аварийных отказов магистральных трубопроводов: моделирование зон загрязнения при разливах нефти на суше / Г.В.Широков, В.И. Ларионов, Т.С. Суцев // Трубопроводный транспорт. – 2010. – №2 (18). – С. 20-24.

3. Козлитин А.М. Количественный анализ риска возможных разливов нефти и нефтепродуктов / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин // Управление промышленной и экологической безопасностью производственных объектов на основе риска: Междунар. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2005. – С. 135-160.

4. Чуб И.А. Количественная оценка масштабов аварийных разливов нефти при авариях на нефтепроводе / И.А. Чуб, А.А. Неронов, В.М. Попов // Збірник наукових праць ХУПС. – 2012. – Вып. 1(30). – С. 185-188.

5. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах / Утверждено Министерством топлива и энергетики РФ 1 ноября 1995 г. – 122 с.

6. Чуб И.А. Моделирование потерь нефти при авариях на трубопроводах / И.А. Чуб, А.А. Неронов // Проблемы чрезвычайных ситуаций. – 2012. – Вып. 16. – С. 131-137.

7. Неронов А.А. Анализ методик определения количественных характеристик аварийных разливов нефти на суше / А.А. Неронов, И.А. Чуб // Проблемы чрезвычайных ситуаций. – 2013. – Вып. 17. – С. 93-98.

8. Неронов А.А. Моделирование влияния времени локализации и ликвидации аварийного разлива нефти на характеристики зоны загрязнения / А.А. Неронов, И.А. Чуб // Проблемы чрезвычайных ситуаций. – 2012. – Вып. 15. – С. 98-103.

9. Пуликовский К.Б. Анализ риска от аварийных разливов нефти на трубопроводной системе Сахалин-2 / К.Б. Пуликовский, В.И. Ларионов, В.Г. Кумохин. – М.: ЦИЭКС, 2006. – 47 с.

I.A. Chub, V.A. Andronov, O.A. Neronov, S.E. Vazhynskiy

#### **Модельювання впливу випарування на об'єм втрат нафти при аваріях на трубопроводах**

Визначається залежність втрат на випарування у атмосферу при аварійному розливі нафти з урахуванням швидкості вітру та температури навколишнього середовища.

**Ключові слова:** аварійний розлив нафти, втрати нафти на випарування, температура, швидкість вітру.

I.A. Chub, O.A. Neronov, S.Ye. Vazhynskiy

#### **Modelling the impact on the amount of evaporation oil losses during pipeline accidents**

It is determined the dependence of the loss by evaporation into the atmosphere of oil spills considering wind speed and ambient temperature.

**Keywords:** emergency oil spill, oil losses to evaporation, temperature, wind speed.