

жения полигона.

*Шаг 3.* Поиск «перспективного» населенного пункта.

Для данных  $k$  населенных пунктов проводится уточненный анализ. Выполняется прямой ход метода Дейкстры по определению минимального маршрута, на котором на всех остальных пунктах, характеризующихся значениями  $p_j$ , проставляются метки  $M_{ij}$ , отражающие стоимость перевозок из  $p_j$  в  $p_i$ . Полную стоимость перевозок из  $k$  населенных пунктов с учетом качества дорог определим по выражению:

$$S_i = \sum_{j=1}^k p_j \cdot M_{ij} . \quad (5)$$

Из всех пунктов выбирается пункт, для которого  $S_i = \min$ .

Таким образом, для минимизации транспортных расходов при транспортировании и переработке НЗГ выбор оптимального места размещения перерабатывающего предприятия должен проводиться с учетом рисков и опасностей возникновения аварийных разливов нефти и с учетом дорожной сети и инфраструктуры нефтедобывающего региона.

#### Литература

1. Постановление Правительства РФ «О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации» от 15 апреля 2002 г. № 240.
2. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах, колл.авт. 2-е изд., испр. М.: Гос. унит. предпр. «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002.
3. Аналитическая служба // Нефть и капитал. VII-VIII, 2003. с. 54-58.
4. Суфиянов Р.Ш. Отходы производства нефтехимической промышленности /Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. № 5, 2010. с. 36-40.
5. РД «Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах», утв. ОАО «АК «Транснефть»» 30.12.99 пр. № 152, согл. Госгортехнадзором России № 10-03/418 от 07.07.99г.
6. Гражданкин А.А., Лисанов М.В., Печеркин А.С. и др. Характерные ошибки анализа риска аварий при декларировании промышленной безопасности // Безопасность труда в промышленности. № 10, 2004. с. 6-12.

### **Оценка условий инфильтрации нефтепродуктов в грунт при коррозионном повреждении обшивки резервуаров**

Куц Ю.Н., д.т.н. Корольченко И.А., к.т.н. доц. Векслер Г.Б.  
Университет машиностроения

*Аннотация.* Предложена методология оценки скорости просачивания жидкости при воздействии напора струи, а также при безнапорной фильтрации. Получены выражения, связывающие объёмный расход фильтрующейся сквозь грунт жидкости с размерами накапливающейся под резервуаром «линзы». Получены результаты расчёта интенсивности инфильтрации нефтепродуктов из аварийных резервуаров в грунты с различными характеристиками.

*Ключевые слова:* пролив нефтепродуктов в грунт, моделирование инфильтрации.

При коррозионном повреждении резервуаров происходят аварийные потери нефтепродуктов в результате их истечения и инфильтрации в грунт промплощадки. Если резервуарный парк не оснащён автоматизированными системами контроля уровня налива нефтепро-

дукта, потери нефтепродукта могут быть очень существенными. Образование сквозных коррозионных язв в металлической оболочке резервуара, приводящее к потере значительных количеств нефтепродукта, отмечено при эксплуатации хранилищ нефтепродуктов различных ведомств [1-4]. Оценкой коррозионной стойкости металлических оболочек резервуаров, вопросами снижения потерь продукции при хранении, локализацией возможных проливов занимаются достаточно давно. И все-таки из-за сложности описания рассматриваемых явлений методики расчетных оценок постоянно совершенствуются, так как они должны учитывать особенности инфраструктуры объектов и накапливающиеся при регулярных обследованиях новые данные. Для анализа периодически возникающих аварийных ситуаций с проливом хранимого продукта через коррозионные отверстия в резервуарах, формулирования эффективных способов поиска следов нефтепродукта в грунте и мероприятий по локализации потерь (расчет дренажных систем и т.п.) необходимо знать особенности инфильтрации жидкости в слои грунта при истечении ее из резервуара.

Оценить параметры, характеризующие процесс истечения из резервуаров, можно с использованием некоторых результатов регистрации потерь нефтепродуктов [1-4]. Время истечения жидкости из резервуара определяется при интегрировании следующего выражения [5]:

$$d\tau = -\frac{S \cdot dH}{\alpha \cdot S_0 \cdot \sqrt{2g \cdot H}}, \quad (1)$$

где: S – площадь зеркала жидкости в резервуаре;

H – уровень жидкости над отверстием;

g – ускорение силы тяжести;

S<sub>0</sub> – суммарная характеристическая площадь сечения отверстий в резервуаре;

α = φ · ε – коэффициент расхода;

φ – коэффициент скорости;

ε = S<sub>2</sub>/S<sub>0</sub> – коэффициент сжатия струи;

S<sub>2</sub> – площадь сжатого сечения струй.

В результате интегрирования формулы (1) с учётом сложной конфигурации некоторых резервуаров рассматриваемых объектов [1-4] получаем необходимое для определения времени истечения соотношение:

$$\tau = \frac{1}{\alpha \cdot S_0} \cdot \left\{ 19,87 \cdot \left[ (3,46 - H_2)^{1,5} - (3,46 - H_1)^{1,5} \right] + 0,28 \cdot (H_2^{2,5} - H_1^{2,5}) - 1,64 \cdot (H_2^{1,5} - H_1^{1,5}) - 390 \cdot (\sqrt{H_2} - \sqrt{H_1}) \right\}, \quad (2)$$

где: H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> – соответственно уровни жидкости (над отверстием) до и после начала утечки, м.

Анализ имеющихся данных об аварийных утечках нефтепродукта [1-4] позволяет говорить о близкой динамике истечения хранимой жидкости из резервуаров (таблица 1).

Таблица 1

**Параметры истечения нефтепродукта через коррозионные отверстия в оболочке резервуаров**

Суммарная площадь сечения обнаруженный отверстий в оболочке S <sub>0</sub> , м <sup>2</sup>	α S <sub>0</sub>	Коэффициент расхода α
6,3 · 10 <sup>-4</sup>	0,83 · 10 <sup>-6</sup>	1,3 · 10 <sup>-3</sup>
1,9 · 10 <sup>-4</sup>	1,4 · 10 <sup>-6</sup>	7,5 · 10 <sup>-3</sup>
?	1,2 · 10 <sup>-6</sup>	-
?	2,16 · 10 <sup>-6</sup>	-

Приведенные в таблице 1 результаты оценки комплекса αS<sub>0</sub> достаточно близки, что может говорить и об однородности грунта площадки объекта. Труднее определить коэффици-

ент расхода, так как величина суммарного проходного сечения коррозионных отверстий оценивалась по среднестатистическому размеру обнаруживаемых на объектах язв. В дальнейших расчетах будем использовать значение  $\alpha S_0 = 1,4 \cdot 10^{-6}$ .

Вопросы просачивания жидкостей через слой из твердых дисперсных частиц под действием напора рассмотрены в монографиях [5, 6]. Явление безнапорной фильтрации жидкости в грунтах различного состава описывается алгоритмами, изложенными в работе [7]. Кроме того, из курса гидравлики [8] известно, что при нормальном падении струи на твердую поверхность она будет оказывать давление на грунт практически в 2 раза больше гидростатического (см. формулу (3)).

$$P = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot f_1 \cdot H, \quad (3)$$

где:  $\rho$  – плотность жидкости;

$H$  – уровень жидкости над отверстием;

$f_1$  – площадь сечения струи.

С учетом этого можно предположить, что часть нефтепродукта будет проникать в грунт на определённую глубину под действием напора струи. В дальнейшем инфильтрация жидкости в слое грунта будет происходить безнапорно в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Расчеты выполнялись для керосина, данные по свойствам которого взяты из справочника [9]. С учетом календарного промежутка, в который был отмечен рассматриваемый инцидент с резервуаром, и климатических особенностей региона [12] приняты следующие величины параметров: плотность жидкости  $\rho$  составляет  $780 \text{ кг/м}^3$ ; кинематическая вязкость равна  $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Со свойствами грунта определить сложнее. Его характеристики уточнялись в результате расчетов. Просачивание или фильтрация жидкости через пористую среду под действием перепада давлений описывается следующим образом [5]:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d_s} \cdot \frac{\rho \cdot \varpi^2}{2}, \quad (4)$$

где:  $\Delta P$  – перепад давлений по высоте слоя;

$\lambda$  – коэффициент сопротивления слоя;

$l$  – длина канала пор в слое;

$d_s$  – эквивалентный диаметр проходного сечения пор;

$\varpi$  – действительная скорость движения жидкости.

$$d_s = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a} = \frac{2 \cdot \Phi \cdot \varepsilon \cdot d}{3 \cdot (1 - \varepsilon)}, \quad (5)$$

где:  $\varepsilon$  – порозность слоя грунта;

$a$  – удельная поверхность слоя,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;

$d$  – диаметр шара, эквивалентного усредненной частице грунта;

$\Phi$  – фактор формы.

С учетом выражения (5) формула (4) преобразовывается к виду

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{3 \cdot (1 - \varepsilon)}{2 \cdot \varepsilon^3 \cdot \Phi} \cdot \frac{H}{d} \cdot \frac{\rho \cdot \varpi_0^2}{2}, \quad (6)$$

где:  $\varpi_0 = \varpi \cdot \varepsilon$  – фиктивная скорость движения жидкости в слое;

$H$  – высота слоя.

Для всех режимов просачивания жидкости коэффициент сопротивления слоя может оцениваться следующим образом [5]:

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}} + 2,34, \quad (7)$$

где  $\text{Re} = \frac{\varpi \cdot d_3}{\nu}$  – критерий Рейнольдса.

Для оценки режима просачивания жидкости под напором воспользуемся данными справочника [6], согласно которому грунт из активированного глинозема (усредненный размер частиц  $d$  составляет  $2 \cdot 10^{-3}$  м) имеет порозность  $\varepsilon = 0,5$  и коэффициент формы  $\varphi = 1/(2\Phi) = 0,68$ . Откуда следует, что величина фактора формы  $\Phi$  равна  $0,707$ . Эквивалентный диаметр проходного сечения пор оценивается по формуле (5) приближенно в  $0,94$  мм. Удельная поверхность рассматриваемого диспергированного грунта  $a$  составляет  $2120,9 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Зная фактическую скорость движения жидкости в слое, с помощью формул (5)-(7) можно определить коэффициент сопротивления грунта и предельную глубину просачивания нефтепродукта под действием напора. Оценка скорости просачивания может выполняться экспериментально. Мы это сделаем с помощью анализа известных гидрологам [7] данных о коэффициентах фильтрации  $k$  грунтов различного типа. Расход жидкости при ламинарной фильтрации в грунте может быть определен по закону Дарси [7]:

$$Q = k \cdot F \cdot \frac{h_f}{L} = k \cdot F \cdot J, \quad (8)$$

где:  $F$  – площадь сечения фильтрующего слоя;  
 $h_f = H_1 - H_2$  – потеря напора в различных сечениях фильтрующего слоя;  
 $L$  – протяженность слоя, на которой происходит потеря напора;  
 $J$  – гидравлический уклон.

Границы применимости формул Дарси определяют с помощью выражения [7], характеризующего критическую скорость фильтрации (верхняя граница для ламинарного режима):

$$w_k = \frac{\nu \cdot (0,75 \cdot \varepsilon + 0,23) \cdot N}{d}, \quad (9)$$

где величина  $N$  принимается от 7 до 9.

Для вышепринятых свойств грунта критическая скорость фильтрации (при  $N = 7$ ) составляет  $0,00423$  м/с.

Для плавноизменяющегося движения градиент напора по длине уклона определяет величину  $J$  следующим образом [7]:

$$J = -\frac{dH}{dl}. \quad (10)$$

В этом случае справедлива формула Дюпюи:

$$w = -k \cdot \frac{dH}{dl} \quad (11)$$

и формула (8) преобразуется к виду:

$$Q = -k \cdot F \cdot \frac{dH}{dl}, \quad (12)$$

Либо, согласно [7]:

$$Q = k \cdot F \cdot (i_0 - dh/dl), \quad (13)$$

где:  $i_0 = -dz/dl$  – градиент высоты положения упора накапливающегося слоя жидкости;  
 $h = p/(\rho g)$  – глубина потока.

В теории гидравлики [7] рассматривают также расход жидкости в вертикальном сечении потока  $q = Q/b$  ( $b$  – ширина потока). Если мы хотим знать максимальный временной

промежуток, в течение которого в районе расположения резервуара будет накапливаться и рассасываться «линза» с нефтепродуктом, необходимо рассмотреть горизонтальное расположение упора потока жидкости ( $i_0 = 0$ ). В этом случае из выражения (13) следует

$$\frac{dh}{dl} = -\frac{q}{k \cdot h}, \quad (14)$$

Если разделить переменные этого уравнения и проинтегрировать, получим следующее соотношение для определения дистанции изменения глубины потока от  $h_1$  до  $h_2$ :

$$l = \frac{k}{2q} \cdot (h_1^2 - h_2^2). \quad (15)$$

Предельное удаление (по горизонтали) растекающегося нефтепродукта от сечения потока инфильтрации с высотой  $h_1$  (либо любого сечения потока высотой  $h$ ) соответствует условию  $h_2=0$ . Тогда из выражения (15) следуют соотношения:

$$l = \frac{k}{2q} \cdot h^2, \quad (16)$$

и

$$h = \sqrt{\frac{2q \cdot l}{k}}. \quad (17)$$

Дифференцирование выражения (17) по длине растекающегося потока приводит к следующему:

$$\frac{dh}{dl} = \sqrt{\frac{2}{k}} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{q}{l}} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{l}{q}} \cdot \left( k \cdot \frac{dh}{dl} + k \cdot h \cdot \frac{d^2h}{dl^2} \right) \right]. \quad (18)$$

Анализ выражения (14) показывает, что вторая производная  $d^2h/dl^2=0$ . Следовательно, соотношение (18) упрощается и его можно переписать следующим образом:

$$\frac{dh}{dl} \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{k \cdot l}{2q}} \right) = \sqrt{\frac{q}{2k \cdot l}}, \quad (19)$$

или

$$\frac{dh}{dl} = \frac{q}{\sqrt{k \cdot l}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2q} + \sqrt{k \cdot l}}. \quad (20)$$

С учетом понятия  $q$  [7] и формулы (20) можно записать:

$$q = -k \cdot h \cdot \frac{q}{\sqrt{k \cdot l}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2q} + \sqrt{k \cdot l}}. \quad (21)$$

После преобразования получаем:

$$\sqrt{2q} + \sqrt{k \cdot l} = -h \cdot \sqrt{\frac{k}{l}}. \quad (22)$$

Из соотношения (22) следует:

$$q = -\frac{k}{2} \cdot \left( l + 2h + \frac{h^2}{l} \right) = -\frac{k}{2l} \cdot (l + h)^2. \quad (23)$$

Учитывая, что расход  $Q=qF/h$ , приходим к следующему выражению:

$$Q = -\frac{k \cdot F}{2h \cdot l} \cdot (l + h)^2. \quad (24)$$

Так как коэффициент фильтрации  $k$  имеет размерность линейной скорости потока, формула (24) связывает объёмный расход просачивающейся сквозь грунт жидкости с размерами накапливающейся под резервуаром «линзы». Выражение (24) даёт положительные величины расхода, так как  $dh/dl$  в соотношении (14) меньше нуля.

Необходимо принять во внимание, что часть нефтепродукта может проникнуть в слой грунта под действием напора струи. Оценим возможную глубину такой «инъекции». По формуле (3) оценим избыточное давление струи на участок грунта под отверстием. Если предположить, что поперечное сечение струи, вытекающей из резервуара, равно среднему значению сечения отверстия (около  $3,15 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ), получим  $\Delta P = 1,63 \text{ Па}$ . Теперь из выражения (6) мы можем определить предельную глубину «впрыска» нефтепродукта в грунт. Выполнив оценки с помощью формул (5)-(7), получим  $H = 0,18 \text{ мм}$ . То есть, проникновение жидкости в грунт под действием напора рассматриваемой струи истечения из резервуара не существенно и им можно пренебрегать.

Тогда описание процесса инфильтрации будет сводиться к совокупности процессов безнапорного просачивания по горизонтали и в нижние слои. Фильтрация утечек нефтепродукта в горизонтальном направлении описывается формулой (24). Если принять характеристики грунта под резервуаром однородными, можно рассматривать концентрическую модель роста нефтесодержащего пятна в грунте. Режим и алгоритм расчёта для вертикального просачивания жидкости определяется в результате дополнительных оценок.

Согласно выражению (8) параметр  $J = hf/L$ . Потерю напора  $hf$  в слое грунта высотой  $L$ , пропитанном инфильтратом, можно оценить с помощью уравнения Бернулли [5]:

$$z + \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2g} = \text{const} \quad (25)$$

В рассматриваемых условиях скорость фильтрации практически не меняется ( $\omega_1 \approx \omega_2$ ) и напор равен изменению гидростатического давления в слое. С учётом  $z_1 - z_2 = L$ , можно записать:

$$h_f = L + \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\rho \cdot g} \quad (26)$$

И согласно формуле (8):

$$J = 1 + \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\rho \cdot g \cdot L} \quad (27)$$

Если жидкость перемещается в нижерасположенные слои грунта только за счёт гидростатического давления,  $J = 2$ . Это значение и будет использоваться в алгоритмах оценок динамики фильтрации жидкости по вертикальной направляющей. Для сравнения при выше разобранном случае «впрыска» в грунт струи жидкости  $J = 2,18$ .

Теперь с учётом ориентировочных значений коэффициентов фильтрации грунтов различных типов [7] можно выполнить оценку линейной скорости фильтрации ( $\omega \approx k \cdot J$ ). Для рассматриваемого объекта можно сказать, что величина  $k$  будет меняться в пределах от 0,02 м/сутки (глина, суглинок) до 0,1-1 м/сутки (суглинок, супесь). Скорость фильтрации  $\omega$  в этом случае может оцениваться в пределах от  $5,4 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$  до  $2,7 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ . Это гораздо ниже критической скорости фильтрации. Значит, процесс будет протекать ламинарно и его можно описывать по закону Дарси (8).

Тогда для фильтрации нефтепродукта, вытекающего из одного коррозионного отверстия (рассматривается потеря до  $0,996 \text{ м}^3$  жидкости), можно записать:

$$Q = 2k_1 \cdot F_1 + \frac{k_2 \cdot F_2}{2h \cdot l} \cdot (l + h)^2, \quad (28)$$

где с учётом концентрического растекания:

$$F_1 = f_1 + \pi \cdot l^2, \quad (29)$$

$$F_2 \approx 2\pi \cdot l \cdot h. \quad (30)$$

Соотношение (30) дополнительно может учитывать рост боковой поверхности заглубившегося в грунт вертикального фронта потока инфильтрации. На данном этапе для упрощения расчётов мы этим фактором пренебрегаем. Отличие величин коэффициентов фильтрации  $k_1$  и  $k_2$  может быть существенным, так как в районе утечки возможно разрыхление грунта и уплотнение подстилающих слоёв в глубине. Именно такие условия будут способствовать образованию временных «линз» с содержанием нефтепродукта. Соотношение коэффициентов фильтрации должно оцениваться эмпирически либо задаваться.

Если  $k_1 \approx k_2 = k$ , выражение (28) можно упростить:

$$Q = 2k \cdot (f_1 + \pi \cdot l^2) + k \cdot \pi \cdot (l + h)^2 \approx k \cdot \pi \cdot (3l^2 + 2h \cdot l + h^2). \quad (31)$$

Так как скорость просачивания практически постоянна, можно для времени инфильтрации в грунт некоторого объёма нефтепродукта  $\Delta V$  записать следующее:

$$\tau = \frac{\Delta V}{k \cdot \pi \cdot (3l^2 + 2h \cdot l + h^2)}. \quad (32)$$

С учётом  $h = \Delta V / (\pi \cdot l^2)$  формулу (32) можно преобразовать к виду:

$$\tau = \frac{\pi \cdot \Delta V \cdot l^4}{k \cdot \left[ 2 \cdot (\pi \cdot l^3)^2 + (\pi \cdot l^3 + \Delta V)^2 \right]}. \quad (33)$$

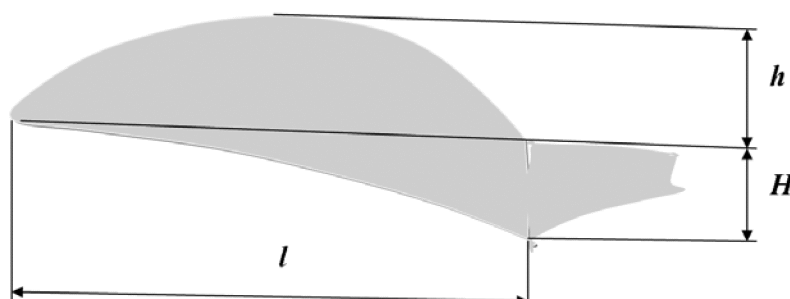
Рассмотрим этот вариант, а также случай при  $k_1 \approx 0,5 \cdot k_2$  (рыхлый грунт у коррозионного отверстия, дополнительно способствующий образованию «линз»). Для этого варианта выражение (31) преобразуется к виду:

$$Q \approx k \cdot \pi \cdot (2l^2 + 2h \cdot l + h^2), \quad (34)$$

а соотношение (33) модифицируется в

$$\tau = \frac{\pi \cdot \Delta V \cdot l^4}{k \cdot \left[ (\pi \cdot l^3)^2 + (\pi \cdot l^3 + \Delta V)^2 \right]}. \quad (35)$$

Результаты численного расчёта по формулам (33) и (35) в среде Mathematica 8.0 условий инфильтрации пролива в слои грунта представлены ниже.

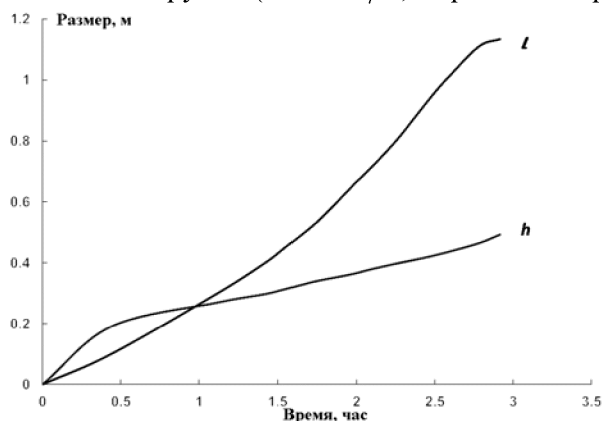


**Рисунок 1 – Вертикальное сечение пропитываемых истекающим нефтепродуктом участков грунта**

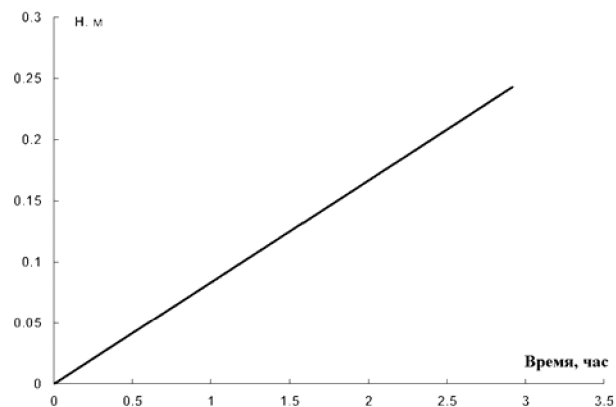
На рисунке 1 приводится приблизительная форма вертикальной проекции образующегося в грунте нефтепродуктосодержащего пятна. Горизонтальная проекция этой концентрической «линзы» – круг. Симметрия правой стороны этого сечения может быть нарушена из-

за близости расположения к отверстию боковой поверхности оболочки резервуара. На форму содержащего нефтепродукт пятна также оказывает влияние близкое расположение других сквозных отверстий в обшивке. Для упрощения оценок будем рассматривать процесс инфильтрации при истечении жидкости в грунт из одного отверстия.

Изменение размеров пятна при постепенном растекании жидкости из каждого отверстия в оболочке резервуара проиллюстрировано на рисунках 2 и 3. Следует иметь в виду, что истекающее из ёмкости количество нефтепродукта ( $\Delta V$ ) распределяется внутри вдвое большего объёма грунта ( $V = \Delta V/\varepsilon$ ; порозность грунта  $\varepsilon = 0,5$ ).



**Рисунок 2 – Изменение размеров пятна нефтепродукта в грунте над уровнем отверстия (протяженность  $l$  и высота  $h$ )**



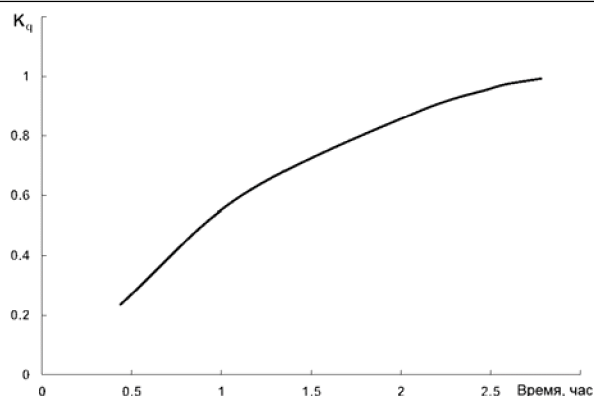
**Рисунок 3 – Изменение глубины проникновения нефтепродукта в грунт**

На рисунке 2 показано изменение во времени протяженности нефтепродуктосодержащего пятна  $l$  и его высоты над уровнем отверстия  $h$  при величинах коэффициента фильтрации  $k$  в вертикальном и горизонтальном направлениях равном 1 (характерно для грунтов типа «супесь»).

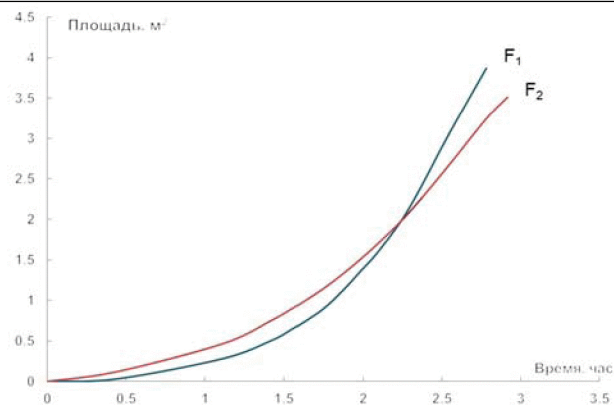
Из рисунка 2 видно, что в начальной стадии истечения нефтепродукта из коррозионного отверстия повышенное сопротивление грунта просачиванию ведёт к превалированию «всплывания» жидкости по внутренним свободным каналам пор грунтовых слоёв. При этом интенсивность роста высоты нефтепродуктосодержащего пятна выше, чем скорость изменения его протяжённости. Через полчаса истечения эта тенденция меняется на противоположную. В конце процесса инфильтрации в грунт около  $1 \text{ м}^3$  жидкости горизонтальный характеристический размер верхней части пятна более, чем в 2 раза превышает высоту поднятия жидкости над уровнем отверстия. Глубина проникновения нефтепродукта в слои грунта под отверстием в резервуаре меняется гораздо медленнее (см. рисунок 3).

Так как процесс инфильтрации нефтепродукта в вертикальном направлении подчиняется закону Дарси, получаем линейную зависимость. Впрочем, расход жидкости в направлении вертикально вниз меняется нелинейно, так как в этот процесс постепенно вовлекается нефтепродукт, распределявшийся в грунте над уровнем отверстия (см. рисунок 2). Изменение соотношения расходов  $K_q$  просачивающейся жидкости в вертикальном и горизонтальном направлениях (вниз и в стороны от отверстия) показано на рисунке 4. При сравнении характера изменения коэффициента  $K_q$  с динамикой роста площадей сечений фильтрационных потоков в вертикальном ( $F_1$ ) и горизонтальном ( $F_2$ ) направлениях (см. рисунок 5) становится ясно, что для рассматриваемых грунтов интенсивность просачивания нефтепродукта в нижерасположенные слои заметно уступает скорости распространения жидкости в горизонтальном направлении. Из рисунка 5 видно, что значения максимальной площади нормального сечения потоков фильтрации жидкости в вертикальном и горизонтальном направлениях достаточно близки. Выравнивание величин потока ( $K_q \rightarrow 1$ ) происходит уже при заметном превосходстве значений  $F_1$ .





**Рисунок 4 – Изменение соотношения потоков инфильтрации в вертикальном и горизонтальном направлениях**

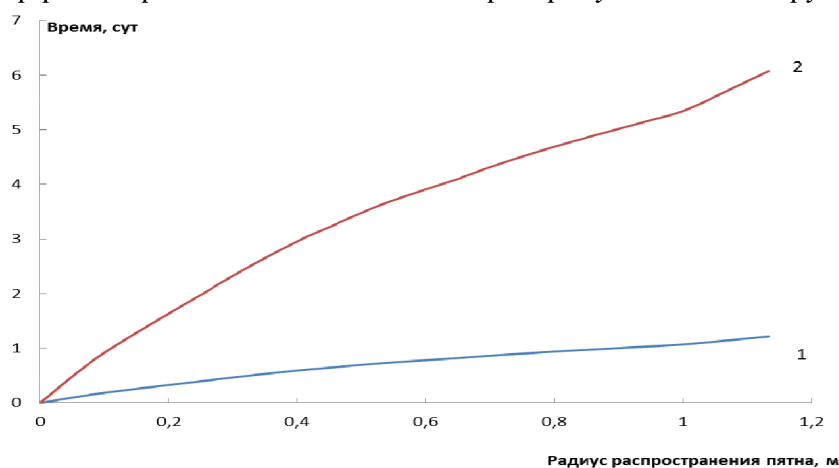


**Рисунок 5 – Изменение максимальной площади нормального сечения потоков фильтрации жидкости в вертикальном (F<sub>1</sub>) и горизонтальном (F<sub>2</sub>) направлениях**

В результате закупоривания отверстия продуктами коррозии либо после откачки жидкости до уровня ниже сквозной язвы истечение нефтепродукта прекращается. Тогда вертикальная составляющая потока инфильтрации начинает играть большую роль. В этом случае пятно нефтепродукта преимущественно оседает до контакта с водоносными или песчаными слоями грунта промплощадки.

Дополнительно будет способствовать образованию «линз» разрыхление грунта у коррозионного отверстия и, соответственно, уплотнение его в глубину. В этом случае возможно рассматривавшееся нами выше соотношение значений коэффициентов фильтрации в вертикальном  $k_1$  и горизонтальном  $k_2$  направлениях:  $k_1 \approx 0,5 k_2$ . Это, ухудшая просачивание нефтепродукта вниз, увеличивает время истечения из резервуара заданного количества жидкости ( $0,996 \text{ м}^3$ ) на 32,7 %. При  $k_2=1$  подобная задержка составляет около 1 часа.

Аналогичный представленным на рисунках 2-5 вид зависимостей (только иначе распределённых во времени) мы получаем и в расчётах для меньших значений коэффициентов фильтрации ( $k = 0,02-0,1$ ), которые характерны для грунтов глина – суглинок [7]. На рисунке 6 показан характер роста протяженности пятен с нефтепродуктом в этих грунтах.



**Рисунок 6 – Изменение характеристического размера пятна с нефтепродуктом для грунтов с  $k = 0,1$  (кривая 1) и с  $k = 0,02$  (кривая 2)**

Оцененное по результатам рассматриваемого происшествия с резервуаром количество нефтепродукта, теряемое через одно отверстие, в грунтах с рассматриваемыми характеристиками будет формировать «линзу» расчётных размеров в течение 1-6 суток. Упомянутый инцидент произошёл за 7 суток. То есть грунт в районе расположения резервуара мог быть

ещё сложнее. Расчётная оценка даёт величину коэффициента фильтрации  $k = 0,0173$ . Глинистые грунты с подобными характеристиками также встречаются [7].

Если теперь, пользуясь предложенными алгоритмами, оценить возможность миграции нефтепродукта и рассасывания образовавшейся в грунте «линзы», получим следующие результаты. Данные анализа геоподосновы площадки рассматриваемого объекта говорят о неоднородности грунта по глубине. В 10-15 м под ложем резервуаров могут располагаться песчаные пласты. Персоналом объекта отмечался периодический подъем грунтовых вод практически до оболочек некоторых резервуаров. В песчаных грунтах и с участием грунтовых вод интенсивность переноса нефтепродуктов многократно возрастает по отношению к рассмотренным в данной статье вариантам.

В самом неблагоприятном для миграции нефтепродуктов случае возможно просачивание жидкости в плотных глинистых грунтах на глубину 10-15 м, где жидкость достигнет слоёв с содержанием песка (супесь). Этот процесс займёт 213-320 суток. Далее начнётся фильтрация нефтепродукта вдоль расположения твёрдых водоупорных слоёв по горизонтальным направляющим. На 100 м от вертикальной проекции резервуара жидкость может сместиться за 42,9 суток; на 200 м – за 85 суток; на 300 м – за 128,6 суток; на 500 м – за 214,3 суток. То есть, даже в наименее благоприятных условиях вытекший нефтепродукт может оказаться в 500 м от расположения резервуара (за территорией объекта) через 417-534 суток (менее двух лет).

Грунты на объектах рассматриваемого типа весьма отличаются друг от друга. Есть и близкие по свойствам к супеси (см. рисунки 2-5). Даже при своевременном обнаружении начала утечки жидкости откачка её из резервуара вместимостью 5000 м<sup>3</sup> до уровня ниже образовавшихся коррозионных отверстий займёт не менее 5 час (из оценки производительности штатных насосов). За это время в грунты типа супесь может уйти до нескольких м<sup>3</sup> нефтепродукта. Во избежание таких масштабных потерь целесообразно изучить возможность локального расположения дренажных систем. Расположение этих устройств может быть увязано с результатами мониторинга за состоянием соответствующих объектов [1-4]. При этом можно на этих участках использовать грунт с прогнозируемыми характеристиками. В период продолжения эксплуатации рассматриваемых резервуаров внедрение подобных мероприятий по снижению потерь нефтепродуктов (с учётом их масштабности) представляется весьма актуальным.

В дальнейшем, для эффективного применения этого приближённого подхода к изучению инфильтрации нефтепродукта в грунт или построения более сложных моделей (например – на основе двухзонального интегрирования системы дифференциальных уравнений) требуется подробное изучение соответствующих свойств грунтовых слоёв площадок объектов.

### Выводы

В результате анализа рассматриваемых явлений истечения и инфильтрации нефтепродуктов из аварийных резервуаров в грунт предложена методология оценки скорости просачивания жидкости при воздействии напора струи, а также при безнапорной фильтрации. Получены выражения, связывающие объёмный расход фильтрующейся сквозь грунт жидкости с размерами накапливающейся под резервуаром «линзы».

Получены результаты расчёта интенсивности инфильтрации нефтепродуктов из аварийных резервуаров в грунты с различными характеристиками. Определены ориентировочные размеры пятен в грунте с содержанием нефтепродукта в начальной стадии просачивания. Показана опасность миграции нефтепродукта за пределы территории объекта.

Для снижения потерь нефтепродуктов в результате коррозионных повреждений резервуаров целесообразно устройство дренажных систем с локализацией расположения их под наиболее уязвимыми участками оболочки резервуаров.

**Литература**

1. Сыроедов Н.Е., Зарубин А.В., Бельский О.В. Анализ функционирования технических средств нефтепродуктообеспечения // В сб.: Труды 25 ГОСНИИ МО РФ. – М.: 2010, Вып. 55. с. 300-312.
2. Таран В.М., Дмитриев С.В. Исследование процесса коррозионного разрушения стенки горизонтального стального заглубленного резервуара для горючего // В сб.: Труды 25 ГОСНИИ МО РФ. М.: 2010, Вып. 55. с. 313-317.
3. Маньшев Д.А., Попов О.В., Швыков Р.В. Исследование сохраняемости углеводородных ракетных топлив в средствах хранения // В сб.: Труды 25 ГОСНИИ МО РФ. М.: 2010, Вып. 55. с. 79-85.
4. Маньшев Д.А., Абдуллин Ф.Н., Александров А.Ю. Способ локализации проливов гептила на грунт и воду с использованием твердого остатка пиролиза // В сб.: Труды 25 ГОСНИИ МО РФ. М.: 2010, Вып. 55. с. 86-90.
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия. 1973. 750 с.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение. 1992. 672 с.
7. Константинов Н.М., Петров Н.А., Высоцкий Л.И. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. М.: Высшая школа. 1987. 432 с.
8. Рабинович Е.З. Гидравлика. М.: Недра. 1980. 280 с.
9. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник под ред. В.А. Школьников. М.: ИЦ Техинформ. 1999. 596 с.
10. СНиП 23-01-99. Строительная климатология.

**Способ оценки возможности микробиологического самовозгорания продукции на объектах хранения**

Гаврилов А.В., д.т.н. Корольченко И.А.  
Университет машиностроения

*Аннотация.* Показана возможность микробиологического самовозгорания продукции в условиях хранения. Представлена методология расчёта условий очагового самовозгорания хранимых материалов. Предложены алгоритмы определения безопасных условий хранения. Приведены основные направления деятельности по профилактике микробиологического самовозгорания на хозяйственных объектах.

*Ключевые слова:* универсальный алгоритм, подготовка проб, компоненты природной среды, опасные химические вещества, автоматизация, отбор проб, скрининг, экспресс-методы, фильтрация.

На объектах складского назначения России хранится огромный перечень материалов растительного и животного происхождения, некоторые из них хранятся длительное время. Различные зернопродукты хранятся на элеваторах, в крытых складских помещениях содержатся овёс, натуральный каучук, хлопок, шерстяные изделия, крупы, мука и т.п. Вся эта продукция характеризуется невысокой теплопроводностью, что способствует аккумуляции тепла, выделяющегося в результате процессов термоокисления. Если характеристический размер ёмкости с сыпучим материалом или зоны компактной укладки (штабеля) продукции превышает критическую для заданных температурных условий величину, то в результате непрерывного разогрева массы материала произойдёт самовозгорание. Ограничивая размер бункера или штабеля, можно самовозгорание хранящейся продукции предотвращать. В этом случае будет обеспечиваться эффективный теплоотвод.