

# **Методы оценки параметров разлива нефти и процессов его контролируемого горения в ледовых условиях Арктической зоны Российской Федерации**

**Долгов А.А.**, к. физ.-мат. н., доц., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ),  
в. н. с. науч.-исслед. отдела, г. Москва, Россия

SPIN-код: 9808-0600

**Барышев Е.М.**, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ),  
с. н. с. науч.-исслед. отдела, г. Москва, Россия

SPIN-код: 2063-5229

**Зиновьев С.В.**, к. т. н., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ),  
зам. нач. науч.-исслед. центра, г. Москва, Россия

SPIN-код: 7969-5572

**Тузов Ф.К.**, к. геогр. н., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ),  
с. н. с. науч.-исслед. отдела, г. Москва, Россия

SPIN-код: 5658-8607

**Большагин А.Ю.**, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ),  
зав. лабораторией, г. Москва, Россия

SPIN-код: 1440-5194

## **Аннотация**

Представлены результаты расчетов и анализа параметров процессов, сопровождающих гипотетический разлив нефти в арктических условиях, в акватории размещения морской ледостойкой стационарной платформы «Приразломная» в Баренцевом море, проводимых в рамках Межведомственных опытно-исследовательских учений сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций «Безопасная Арктика-2023». В процессе учений проводилась апробация Методических рекомендаций по оценке опасности подводных потенциально опасных объектов во внутренних водах и территориальном

море Российской Федерации и Методики расчета выбросов поллютантов и теплоты при горении нефти и нефтепродуктов на различных типах подстилающей поверхности. Результаты апробации показали работоспособность методик в условиях свободной от льда поверхности моря и необходимость внесения в Методические рекомендации алгоритма расчета параметров разлива нефти в акваториях арктических морей с наличием ледового покрова. Приведены эмпирические выражения, адекватно описывающие механизмы распространения разливов нефти и возможность проведения их контролируемого выжигания в ледовых условиях.

**Ключевые слова:** методическое обеспечение; прогнозирование чрезвычайных ситуаций; природно-арктические условия; разливы нефти; алгоритм расчета; горение разливов; поллютанты; коэффициенты эмиссии.

В период с 4.04 по 7.04. 2023 в Арктической зоне Российской Федерации проводились масштабные Межведомственные опытно-исследовательские учения сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций «Безопасная Арктика — 2023». В рамках учений осуществлялась опытно-исследовательская отработка потенциально возможных для этого региона природно-техногенных чрезвычайных ситуаций, в частности: исследования по 15 вводным (сценариям). Одна из вводных была посвящена теме разлива нефти при погрузке в танкер с морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) «Приразломная». В этой вводной решались три опытно-исследовательские задачи, посвященные апробации двух методик и одних методических рекомендаций:

Задача 1. Апробация Методических рекомендаций по оценке опасности подводных потенциально опасных объектов во внутренних водах и территориальном море Российской Федерации (Утверждены МЧС России 02.12.2021 № ДЗ-17-802-5172-ВЯ) в части оценки опасности распространения нефти и нефтепродуктов из ППОО.

Задача 2. Апробация Методики определения ущерба охраняемым законом ценностям в результате чрезвычайной ситуации, в том числе в динамике, при непринятии мер по ликвидации и с принятием мер по ликвидации. (Расширенный вариант Методики оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций приказ МЧС России от 01.09.2020.

Зарегистрирована в Минюсте России 25 ноября 2020 г. № 61087) (далее — Методика-1).

Задача 3. Аprobация Методики расчета выбросов поллютантов и теплоты при горении нефти и нефтепродуктов на различных типах подстилающей поверхности (Утверждена приказом Госкомэкологии России № 90 от 05.03.1997) (далее — Методика-2).

В статье приведены результаты аprobации Методики-1 из задачи 1 и Методики-2 из задачи 3.

## **1. Проверка возможности применения Методики-1 в части оценки опасности распространения нефти и нефтепродуктов в ледовых условиях арктических морей**

Апробируемая Методика-1 в изначальном своем предназначении была призвана обеспечивать расчет параметров разлива нефти и нефтепродуктов из подводных потенциально опасных объектов. Согласно Методике-1 нефть из ППОО, участвующая в разливе, после разрушения защитных барьеров под действием архимедовой силы всплывает на поверхность с дальнейшей трансформацией нефтяного пятна в водной среде. В рамках учений процесс выхода нефти из ППОО и подъем ее на поверхность не рассматривался.

Согласно сценарию учений разлив нефти в акватории расположения МЛСП «Приразломная» произошел при ее погрузке в танкер. На центральный пост управления морской ледостойкой стационарной платформы «Приразломная» поступило сообщение: «При отгрузке нефти на челночный танкер с МЛСП «Приразломная» в результате разгерметизации системы отгрузки нефти на акваторию Печерского моря произошло истечение нефти. Объявлена «Общеплатформенная тревога», выполнено инициирование системы аварийного останова МЛСП. Суммарное количество разлитой на акваторию нефти составляет 395 тонн (436 м<sup>3</sup>)».

В соответствии с приказом МЧС России от 5 июля 2021 года № 429 «Об установлении критериев информации о чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера» п. 1.5.1 «Загрязнение водного объекта (внутренние морские воды, территориальное море, прилегающая и исключительная экономическая зона Российской Федерации,

а также поверхностные и подземные водные объекты) нефтью (нефтепродуктами) в объеме 1 т и более» сложившаяся в акватории МЛСП «Приразломная» ситуация классифицируется как чрезвычайная.

В соответствии с вводной рассматриваются две задачи:

- прогноз развития чрезвычайной ситуации, вызванной разливом нефти без воспламенения разлива, — Методика-1;
- прогноз развития чрезвычайной ситуации, вызванной разливом нефти с горением разлива, — Методика-2.

### Прогноз развития во времени и пространстве чрезвычайной ситуации, вызванной разливом нефти (без воспламенения разлива)

Для решения 1-й задачи используется «Методика оценки опасности подводных потенциально опасных объектов во внутренних водах и территориальном море Российской Федерации» в части оценки опасности распространения нефти и нефтепродуктов из ППОО (Утверждена МЧС России 02.12.2021 № ДЗ-17-802-5172-ВЯ) (далее — Методика-1).

Методика-1 применяется для открытой воды: без льда как сплошного, так и ледяной крошки. Поскольку условия в акватории проведения учений не соответствуют условиям, необходимым для проведения расчетов по Методике-1, принято решение проводить расчеты гипотетической аварии, произошедшей в акватории расположения МЛСП «Приразломная», в условиях чистой воды (условия, характерные для акватории расположения МЛСП «Приразломная» для июля месяца). Для ледовых условий (в том числе для условий колотого льда и ледяной шуги) использовать результаты круглогодичного эксперимента по исследованию поведения разливов нефти в условиях Баренцева моря, доложенные на конференции 1993 года в Гамбурге [1], и результаты диссертационных исследований Гузенко [2].

При разливе нефти ее растекание является результатом совокупного действия гравитационных сил, сил вязкости и поверхностного натяжения.

Растекание пятна по водной поверхности приводит к увеличению площади загрязнения с одновременным уменьшением его толщины.

Согласно Методике-1, радиус пленки при гравитационно-вязком режиме растекания пятна определяется по формуле:

$$R_n = 1,45(\lambda g V_n^2 t^{3/2} \nu^{-1/2})^{1/6}, \text{ м,}$$

где:

$\lambda = (\rho_B - \rho_n) / \rho_B$  — относительная разность плотностей воды  $\rho_B$  и нефти  $\rho_n$ ;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$V_n$  — объем нефти, м<sup>3</sup>;

$t$  — время с момента пролива нефти, с;

$\nu$  — кинематический коэффициент вязкости воды, м<sup>2</sup>/с;

$\rho_n$  — плотность жидкого нефтепродукта, кг/м<sup>3</sup>.

Дрейф нефтяной пленки по водной поверхности определяется суммарным эффектом действия поверхностного волнения и ветра. На основе наблюдений за малыми объемами разлитой нефти отмечается, что турбулентная диффузия для пленочных образований практически не имеет существенного значения.

Таким образом, имея допущение идеализированного растекания плавучего и нерастворимого химического соединения в спокойной воде, можно говорить о площади нефтяного пятна, исходя из полученного радиуса  $R_n$ .

Значения кинематических коэффициентов вязкости воды представлены на рисунке.

| t°С | t°С    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|     | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| 0   | 1,793  | 1,732  | 1,675  | 1,621  | 1,569  | 1,520  | 1,474  | 1,429  | 1,387  | 1,347  |
| 10  | 1,308  | 1,272  | 1,237  | 1,203  | 1,171  | 1,1401 | 1,1107 | 1,0825 | 1,0554 | 1,0294 |
| 20  | 1,0045 | 0,9905 | 0,9574 | 0,9353 | 0,9139 | 0,8934 | 0,8736 | 0,8545 | 0,8361 | 0,8184 |
| 30  | 0,8012 | 0,7847 | 0,7687 | 0,7533 | 0,7383 | 0,7239 | 0,7099 | 0,6964 | 0,6833 | 0,6706 |
| 40  | 0,6583 | 0,6464 | 0,6348 | 0,6236 | 0,6127 | 0,6022 | 0,5919 | 0,5820 | 0,5723 | 0,5629 |

Рис. Кинематические коэффициенты вязкости воды при различных температурах,  $\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$

Для определения площади пятна принимаем условно, что площадь пятна будет стремиться к площади круга:

$$S_{\text{н}} = \pi R_{\text{н}}^2, \text{ м}^2.$$

Скорость перемещения нефтяного пятна по поверхности воды под действием ветра можно определить по эмпирическому выражению:

$$v_{\text{н}} = 0,05 \times v_{\text{вет}},$$

где  $v_{\text{вет}}$  — скорость ветра, м/с.

Для расчета объема емкостей, необходимых для сбора нефти и нефтепродуктов, нужно учитывать процесс эмульгирования нефти. Объем собираемой водонефтяной эмульсии будет больше, чем объем нефти и нефтепродуктов, участвующих в разливе. Объем эмульсии рекомендуется рассчитывать с допущением, что весь объем нефти и нефтепродуктов, участвующих в разливе, эмульгируется с содержанием воды — 80% в объеме нефти:

$$V_{\text{емк}} = 1,8V_{\text{н}}.$$

## Анализ результатов расчета

В процессе проведения учений с разливом нефти в акватории расположения МЛСП «Приразломная» и апробации Методики-1 участвующие в учениях группы исследователей при осмотре акватории, где по сценарию учений должен произойти разлив 395 т нефти, установили, что в акватории МЛСП «Приразломная» нет чистой воды, т. е. вся акватория плотно заполнена битым льдом и шугой. Поскольку Методика-1 позволяет прогнозировать параметры разливов нефти в условиях чистой воды, было принято решение проводить расчеты гипотетической аварии, произошедшей в акватории расположения МЛСП «Приразломная» в условиях, характерных для июля месяца, а для ледовых условий — использовать результаты исследований поведения разливов нефти в условиях Баренцева моря [1, 2].

Рассчитывались следующие параметры:

1. Относительная разность плотностей воды и нефти,  $\lambda = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{н}})/\rho_{\text{в}}$ .
2. Радиус пятна,  $R_{\text{н}}$ , м.
3. Площадь пятна,  $S_{\text{н}}$ , м<sup>2</sup>.
4. Высота разлива нефти,  $h_{\text{н}}$ , мм.
5. Объем емкостей, необходимых для сбора нефти,  $V_{\text{емк}}$ , м<sup>3</sup>.



С использованием эмпирических выражений из Методики-1 показано, что при возникновении аварийного разлива нефти при ее погрузке в танкер в количестве 436 м<sup>3</sup> радиус разлива, площадь и высота пленки нефти в разливе будут меняться во времени и в течение часа разлив нефти достигнет такой площади на открытой воде, высота пленки нефти в котором станет меньше критического значения (2 мм), при котором горение нефти на воде станет невозможно. Поэтому в условиях открытой воды в акватории МЛСП «Приразломная» в случае чрезвычайной ситуации, связанной с разливом значительного количества нефти (не менее 400 м<sup>3</sup>), операции ЛАРН необходимо начинать в течение первого часа, в противном случае применение наиболее эффективного способа борьбы с аварийными разливами нефти — выжигания, станет невозможным.

Для оценки параметров разлива нефти в ледовых условиях в рамках проводимых учений использовали также эмпирические зависимости, определенные и представленные в диссертационной работе [2]. Показано, что при возникновении аварийного разлива нефти при ее погрузке в танкер в количестве 436 м<sup>3</sup> радиус разлива на ледовую поверхность (на колотый лед и шугу), площадь разлива и высота нефтяной пленки на льду уже через час достигнут равновесных состояний:

- радиус пятна,  $R_n$  — 154 м;
- площадь пятна,  $S_n$ , — 67 150 м<sup>2</sup>;
- высота разлива нефти,  $h_n$  — 6 мм.

Исходные данные и результаты расчета параметров разлива нефти во времени представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Исходные данные и результаты расчета параметров разлива нефти на МЛСП «Приразломная»**

| Характеристика параметра                     | Расчетное выражение | Время от начала разлива, час | Значение параметра |
|--|---------------------|------------------------------|--------------------|
| 1  | 2                   | 3                            | 4                  |
| Масса разлитой нефти, т                      |                     |                              | 395,0              |
| Объем разлитой нефти, $V_n$ , м <sup>3</sup> |                     |                              | 436,0              |

| 1   | 2   | 3     | 4                        |
|---|---|-------|--------------------------|
| Объем емкостей, необходимых для сбора нефти, м <sup>3</sup>     | $V_{\text{емк}} = 1,8V_{\text{н}}$  |       | 784,8                    |
| Температура внешней среды, t, °C                                |   |       | 5                        |
| Плотность нефти, $\rho_{\text{н}}$ , т/м <sup>3</sup>           |   |       | 0,906                    |
| Плотность морской воды, $\rho_{\text{в}}$ , т/м <sup>3</sup>    |   |       | 1,03                     |
| Плотность морского льда, $\rho_{\text{л}}$ , т/м <sup>3</sup>   |   |       | 0,9-0,95, принимаем 0,93 |
| Относительная разность плотностей воды и нефти, $\lambda$ , б/р | $\lambda = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{н}})/\rho_{\text{в}}$                               |       | 0.12                     |
| Радиус пятна, $R_{\text{н}}$ , м                                | на открытой воде:<br>$R_{\text{н}} = 1,45(\lambda g V_{\text{н}}^2 t^{3/2} \nu^{-1/2})^{1/6}$ | 0 мин | 34,5                     |
|   |   | 1 мин | 96                       |
|   |   | 5 мин | 143                      |
|   |   | 1 час | 267                      |
| Радиус пятна, $R_{\text{н}}$ , м                                | на льду: $R_{\text{н}} = 104V_{\text{н}}$   | 1 час | 154                      |
| Площадь пятна разлитой нефти, $S_{\text{н}}$ , м <sup>2</sup>   | $S_{\text{н}} = \pi R_{\text{н}}^2$ — на открытой воде;                                       | 0 мин | 3 737                    |
|   |   | 1 мин | 28 950                   |
|   |   | 5 мин | 144 000                  |
|   |   | 1 час | 224 000                  |
|   | $S_{\text{н}} = 170V_{\text{н}}$ — на льду  | 1 час | 67 150                   |
| Высота разлива нефти, $h_{\text{н}}$ , мм                       | $h_{\text{н}} = V_{\text{н}}/S_{\text{н}}$ — на открытой воде;                                | 0 мин | 117                      |
|   |   | 1 мин | 15                       |
|   |   | 5 мин | 7                        |
|   |   | 1 час | 1,9                      |
|   | $h_{\text{н}} = V_{\text{н}}/S_{\text{н}}$ — на льду  | 1 час | 6                        |

Результаты более подробного расчета параметров разлива, учитывающего плотность воды как функцию от температуры, солености и давления, приведены ниже в табл. 1.2. В расчете использованы следующие исходные данные:

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup> — 9,81;

$V_{\text{н}}$  — объем нефти, м<sup>3</sup> — 436,00;



$t$  — время с момента пролива нефти, с — дискретность — 1 мин;  
 $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости воды, м<sup>2</sup>/с — 1,793;  
 $\rho_n$  — плотность жидкого нефтепродукта, кг/м<sup>3</sup>—905,96;  
 $T$  — температура воды, °С — 0,0;  
 $S$  — соленость воды, епс — 20;  
 $D$  — давление, дБар — 1.

Таблица 1.2

**Расчет характеристик разлива нефти на поверхности на открытой воде**

| Время, мин | Радиус разлива, м | Площадь разлива, м <sup>2</sup> | Толщина слоя, м | Коэффициент полноты сгорания | Количество сгоревшей нефти, кг |
|------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1          | 2                 | 3                               | 4               | 5                            | 6                              |
| 0          | 34,10             | 3653,06                         | 0,11935         | 0,98                         | 388380,92                      |
| 1          | 95,30             | 28531,33                        | 0,01528         | 0,87                         | 343303,32                      |
| 2          | 113,10            | 40183,69                        | 0,01085         | 0,82                         | 322190,11                      |
| 3          | 125,08            | 49146,93                        | 0,00887         | 0,77                         | 305949,37                      |
| 4          | 134,36            | 56710,78                        | 0,00769         | 0,74                         | 292244,23                      |
| 5          | 142,04            | 63378,27                        | 0,00688         | 0,71                         | 280163,24                      |
| 6          | 148,64            | 69408,19                        | 0,00628         | 0,68                         | 269237,46                      |
| 7          | 154,47            | 74954,58                        | 0,00582         | 0,66                         | 259187,81                      |
| 8          | 159,70            | 80117,91                        | 0,00544         | 0,63                         | 249832,22                      |
| 9          | 164,46            | 84968,07                        | 0,00513         | 0,61                         | 241044,10                      |
| 10         | 168,84            | 89555,93                        | 0,00487         | 0,59                         | 232731,23                      |
| 11         | 172,91            | 93919,94                        | 0,00464         | 0,57                         | 224823,95                      |
| 12         | 176,70            | 98090,00                        | 0,00444         | 0,55                         | 217268,12                      |
| 13         | 180,27            | 102089,86                       | 0,00427         | 0,53                         | 210020,66                      |
| 14         | 183,64            | 105938,81                       | 0,00412         | 0,51                         | 203046,65                      |
| 15         | 186,83            | 109652,74                       | 0,00398         | 0,50                         | 196317,28                      |
| 16         | 189,86            | 113244,94                       | 0,00385         | 0,48                         | 189808,49                      |
| 17         | 192,76            | 116726,64                       | 0,00374         | 0,46                         | 183499,90                      |
| 18         | 195,53            | 120107,45                       | 0,00363         | 0,45                         | 177374,12                      |
| 19         | 198,19            | 123395,67                       | 0,00353         | 0,43                         | 171416,10                      |
| 20         | 200,75            | 126598,51                       | 0,00344         | 0,42                         | 165612,79                      |
| 21         | 203,21            | 129722,30                       | 0,00336         | 0,40                         | 159952,71                      |
| 22         | 205,58            | 132772,61                       | 0,00328         | 0,39                         | 154425,77                      |
| 23         | 207,88            | 135754,41                       | 0,00321         | 0,38                         | 149022,98                      |

| 1  | 2      | 3         | 4       | 5    | 6         |
|----|--------|-----------|---------|------|-----------|
| 24 | 210,10 | 138672,10 | 0,00314 | 0,36 | 143736,33 |
| 25 | 212,25 | 141529,65 | 0,00308 | 0,35 | 138558,65 |
| 26 | 214,34 | 144330,64 | 0,00302 | 0,34 | 133483,47 |
| 27 | 216,37 | 147078,30 | 0,00296 | 0,33 | 128504,91 |
| 28 | 218,35 | 149775,56 | 0,00291 | 0,31 | 123617,68 |
| 29 | 220,27 | 152425,10 | 0,00286 | 0,30 | 118816,91 |
| 30 | 222,15 | 155029,36 | 0,00281 | 0,29 | 114098,18 |
| 31 | 223,97 | 157590,59 | 0,00277 | 0,28 | 109457,41 |
| 32 | 225,76 | 160110,86 | 0,00272 | 0,27 | 104890,88 |
| 33 | 227,50 | 162592,06 | 0,00268 | 0,25 | 100395,12 |
| 34 | 229,20 | 165035,97 | 0,00264 | 0,24 | 95966,94  |
| 35 | 230,87 | 167444,21 | 0,00260 | 0,23 | 91603,39  |
| 36 | 232,50 | 169818,30 | 0,00257 | 0,22 | 87301,71  |
| 37 | 234,10 | 172159,65 | 0,00253 | 0,21 | 83059,34  |
| 38 | 235,66 | 174469,59 | 0,00250 | 0,20 | 78873,91  |
| 39 | 237,20 | 176749,34 | 0,00247 | 0,19 | 74743,16  |
| 40 | 238,70 | 179000,06 | 0,00244 | 0,18 | 70665,03  |
| 41 | 240,18 | 181222,83 | 0,00241 | 0,17 | 66637,53  |
| 42 | 241,63 | 183418,66 | 0,00238 | 0,16 | 62658,85  |
| 43 | 243,06 | 185588,52 | 0,00235 | 0,15 | 58727,23  |
| 44 | 244,46 | 187733,29 | 0,00232 | 0,14 | 54841,05  |
| 45 | 245,83 | 189853,84 | 0,00230 | 0,13 | 50998,77  |
| 46 | 247,19 | 191950,97 | 0,00227 | 0,12 | 47198,94  |
| 47 | 248,52 | 194025,42 | 0,00225 | 0,11 | 43440,17  |
| 48 | 249,83 | 196077,94 | 0,00222 | 0,10 | 39721,17  |
| 49 | 251,12 | 198109,19 | 0,00220 | 0,09 | 36040,70  |
| 50 | 252,39 | 200119,82 | 0,00218 | 0,08 | 32397,58  |
| 51 | 253,64 | 202110,45 | 0,00216 | 0,07 | 28790,70  |
| 52 | 254,88 | 204081,66 | 0,00214 | 0,06 | 25219,01  |
| 53 | 256,09 | 206034,02 | 0,00212 | 0,05 | 21681,48  |
| 54 | 257,29 | 207968,05 | 0,00210 | 0,05 | 18177,16  |
| 55 | 258,48 | 209884,26 | 0,00208 | 0,04 | 14705,13  |
| 56 | 259,64 | 211783,13 | 0,00206 | 0,03 | 11264,52  |
| 57 | 260,79 | 213665,12 | 0,00204 | 0,02 | 7854,48   |
| 58 | 261,93 | 215530,69 | 0,00202 | 0,01 | 4474,22   |
| 59 | 263,05 | 217380,24 | 0,00201 | 0,00 | 1122,96   |
| 60 | 264,16 | 219214,19 | 0,00199 | 0,00 | 0,00      |

Сравнение результатов расчета параметров разлива нефти на открытой воде и в ледовых условиях показывает, что и радиус, и, соответственно, площадь разлива нефти в ледовых условиях значительно меньше тех же параметров для условий свободной поверхности моря. Объяснить такое положение можно высокой сорбционной способностью льда к нефти, о чем говорится во многих публикациях, посвященных этому вопросу. С другой стороны, высота нефтяной пленки на льду значительно (более чем в три раза) превышает высоту нефтяной пленки на открытой воде (на один и тот же интервал времени от начала разлива). Поэтому технология выжигания нефти в ледовых условиях более эффективна, чем на открытой воде (Необходима экспериментальная проверка этого вывода).

## **2. Проверка возможности применения методики расчета выбросов поллютантов и теплоты при горении нефти и нефтепродуктов на различных типах подстилающей поверхности при горении разливов нефти в условиях акваторий арктических морей (Методика расчета выбросов утверждена приказом Госкомэкологии России № 90 от 05.03.1997 г.) (Методика-2)**

Для оценки возможностей применения методов выжигания разлитой нефти в качестве способа очистки акватории, покрытой ледяной шугой, необходимы следующие исходные данные:

- масса разлитой нефти — 395 т;
- площадь разлива — 67 150 м<sup>2</sup>;
- плотность нефти — 0.906 т/м<sup>3</sup>;
- критическое значение высоты слоя несгоревшей на воде нефти — 2 мм;
- коэффициенты эмиссии поллютантов,  $K_{\alpha}$  (см. табл. 2.1).

С использованием Методики-2 возможно получить прогнозные значения следующих параметров процесса горения разлива нефти в ледовых условиях:

- масса сгоревшей нефти,  $M_r$ , т;
- масса несгоревшей нефти,  $M_n$ , т;
- коэффициент недожога нефти, б/р;

- масса летучих продуктов горения,  $M_{\alpha 1}$ , т;
- масса конденсированных продуктов горения,  $M_{\alpha 2}$ , т.

Для массы недожога  $M_H$  в этом случае можно использовать формулу:

$$M_H = \rho_0 S_0 h^* = 0,906 \times 67\,150 \times 2 \times 10^{-3} = 121,68 \text{ т.} \quad (2.1)$$

Тогда количество сгоревшей нефти будет:

$$M_T = M_0 - M_H = 395 - 121,68 = 273,32 \text{ т.}$$

Введем коэффициент недожога

$$K_H = \frac{M_H}{M_0} = \frac{121,68}{395} = 0,3. \quad (2.2)$$

Или коэффициент полноты сгорания, определяющий, какое количество исходной массы топлива  $M_0$  сгорело неконтролируемым образом при разливе нефти или нефтепродукта, равен

$$K = \frac{M_0 - M_H}{M_0} = 1 - K_H. \quad (2.3)$$

Очевидно, что по определению  $0 < K_H < 1$  и  $0 < K < 1$ . Для водной поверхности

$$K = 1 - \frac{\rho_0 S_0 h^*}{M_0} = 1 - 0,3 = 0,7. \quad (2.4)$$

Зная  $K$ , легко получим расчетные формулы для выброса вредных веществ и тепла при горении топлива на водной подстилающей поверхности:

$$M_\alpha = K K_\alpha M_0, \quad \alpha = 1 \dots N; \quad Q = q K M_0. \quad (2.5)$$

Значения коэффициентов эмиссии поллютантов приведены в табл. 2.1.

Коэффициенты эмиссии поллютантов при горении нефти,  $K_a$ 

| № | Поллютант                                     | $K_a$ [кг/кг]        |
|---|---|----------------------|
| 1 | Оксид углерода CO                             | $8,40 \cdot 10^{-2}$ |
| 2 | Диоксид углерода CO <sub>2</sub>              | 1,00                 |
| 3 | Оксиды азота NOx                              | $6,9 \cdot 10^{-1}$  |
| 4 | Оксиды серы (в пересчете на SO)               | $2,78 \cdot 10^{-2}$ |
| 5 | Сероводород (H <sub>2</sub> S)                | $1,00 \cdot 10^{-3}$ |
| 6 | Сажа (C)                                      | $1,70 \cdot 10^{-1}$ |
| 7 | Синильная кислота (HCN)                       | $1,00 \cdot 10^{-3}$ |
| 8 | Формальдегид (HCHO)                           | $1,00 \cdot 10^{-3}$ |
| 9 | Органические кислоты (в пересчете на CH COOH) | $1,50 \cdot 10^{-2}$ |

Согласно Методике-2, процесс горения разлива нефти состоит из двух этапов:

1-й этап — этап распространения пламени по поверхности разлива —  $t_1$ ,

2-й этап — послойное горение нефти —  $t_2$ .

Для арктических условий (ледовых условий) скорость распространения пламени при горении разлива нефти по направлению ветра достигает значений: от 0,02 до 0,04 м/с; против ветра: 0,01–0,02 м/с; поперек — 0,01 м/с.

Послойное горение нефти —  $3,4 \cdot 10^{-2}$  мм/с.

Время горения разлива нефти на первом этапе:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2S_n}{\pi(\omega_A + \omega_B)\omega_c}} = \sqrt{\frac{2 \times 67150}{3/14 \times (0,02 + 0,015) \cdot 0,1}} = 11054,5 \text{ с} = 3 \text{ часа.}$$

Время горения разлива нефти на втором этапе:

$$t_2 = \frac{M_0 - M_{\text{гр}} - M_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}} \omega_z S_{\text{н}}}.$$

Здесь:

$$M_{\text{гр}} = \frac{1}{3} \rho_{\text{н}} \omega_z S_{\text{н}} = 0,33 \times 0,906 \times 3,4 \times 10^{-5} \times 3600 \times 67150 = 2482 \text{ кг} = 2,5 \text{ т.}$$

Тогда:

$$t_2 = \frac{M_0 - M_{\text{гр}} - M_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}} \omega_z S_{\text{н}}} = \frac{395 \cdot 10^3 - 2,5 \cdot 10^3 - 121,68 \cdot 10^3}{0,906 \times 3,4 \cdot 10^{-5} \times 67150} = 1,3 \cdot 10^5 \text{ с} = 36,5 \text{ час.}$$

Время горения разлива 395 тонн нефти в ледовых условиях составит порядка 40 часов:  $t_1 + t_2 = 3 + 36,5 = 39,5 \text{ час} \approx 40 \text{ час}$ .

В результате выжигания нефти получены следующие результаты:

- масса сгоревшей нефти составит 273 т;
- масса недожога — 122 т;
- коэффициент недожога — 0.3;
- коэффициент полноты сгорания — 0.7;
- масса газообразных поллютантов — 490 т;
- масса дисперсных поллютантов — 47 т;
- время горения нефти — 40 час.

Количество поллютантов, выброшенных в атмосферу при горении разлива нефти в ледовых условиях, рассчитанных по выражению 2.5, представлено в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Количество поллютантов, образованных при горении разлива нефти**

| № | Поллютант                                     | $M_a$ , т |
|---|---|-----------|
| 1 | Оксид углерода (CO)                           | 22,96     |
| 2 | Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> )           | 273,32    |
| 3 | Оксиды азота (NO <sub>x</sub> )               | 188,59    |
| 4 | Оксиды серы (в пересчете на SO )              | 0,76      |
| 5 | Сероводород (H <sub>2</sub> S)                | 0,27      |
| 6 | Сажа (C)                                      | 46,46     |
| 7 | Синильная кислота (HCN)                       | 0,27      |
| 8 | Формальдегид (HCHO)                           | 0,27      |
| 9 | Органические кислоты (в пересчете на СН СООН) | 4,1       |

Использование Методы-1 и 2 в учениях 2023 позволило оценить возможности этих методик по моделированию реальных процессов разлива нефти в ледовых условиях Российской Арктики. Методика-1 позволила определить (с принятыми дополнительными данными, которые необходимо официально внести в Методику) площадь разлива



в ледовых условиях. В свою очередь, полученное значение площади разлива позволило с использованием Методики-2: определить эффективность метода выжигания разлива нефти в ледовых условиях; определить массы сгоревшей нефти и нефти, оставшейся на месте разлива после выжигания; определить время горения и массы газообразных и дисперсных поллютантов, выброшенных в атмосферу в процессе горения, а также само время горения разлива.

В целом, Методика-1 и Методика-2 показали свою работоспособность и эффективность в вопросах прогнозирования значений параметров разлива нефти в Арктических морях, в ледовых условиях. Прогнозные значения, полученные при помощи этих Методик, могут быть полезными для поддержки принятия решений в аварийных ситуациях на МЛСП «Приразломная».

#### **Список использованных источников**

1. Johannessen B.O. and Jensen H. Experimental oil spills in the Barents Sea marginal ice zone // Proc. of POAC'93 Conference. V. 2. Pp. 708–718.
2. Гузенко Р.Б. Моделирование нефтяного загрязнения морских вод и льдов Арктики и оценка влияния нефтепродуктов на таяние и ледообразование», дис... к. геогр. н. СПб., 2001.