

Г.Г. Матишов, П.Р. Макаревич, С.Л. Дженюк, В.В. Денисов

МОРСКИЕ НЕФТЕГАЗОВЫЕ РАЗРАБОТКИ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ НА ШЕЛЬФЕ



3.2. Моделирование распространения и осаждения взвешенных веществ при укладке подводного газопровода

В соответствии с требованиями российского природоохранного законодательства и действующими нормативными документами при освоении нефтегазовых месторождений на шельфе требуется оценить воздействие строящихся объектов на окружающую среду на всех этапах реализации проекта. При укладке подводных трубопроводов необходимы работы по срезке неровностей дна и подсыпке грунта, чтобы минимизировать свободные пролеты трубопровода для обеспечения его устойчивости и предотвращения прогибов. Работы по срезке грунта вызывают попадание взвешенных веществ в водную среду и их воздействие на морскую биоту, в том числе гибель планктона и бентоса. Для получения количественных оценок ущерба рыбным запасам необходимы расчетные данные об объемах полей взвеси, в которых концентрации взвешенных веществ превышает заданные значения, и о площадях дна, подвергшихся воздействию при работе трубозаглубителя и при осажении взвешенных веществ.

На примере проектируемого газопровода от Штокмановского газоконденсатного месторождения с помощью математических моделей выполнены расчеты:

- 1) объемов образующихся облаков мутности (взвеси), в которых концентрации взвешенных частиц превышают 10, 100 и 1000 мг/л;
- 2) объемов пространства, через которые проплывали эти облака;
- 3) времени существования указанных облаков;
- 4) площади дна, подверженного выпадению взвешенных веществ и отвалу грунта при рытье траншеи по дну Баренцева моря.

Рассмотрим проектный вариант, разработанный ОАО "Гипроспецгаз", по прокладке труб от Штокмановского газоконденсатного месторождения к губе Ура на побережье Кольского полуострова (рис. 73). Форма отвала зависит от объема извлекаемого грунта, а также от его типа.

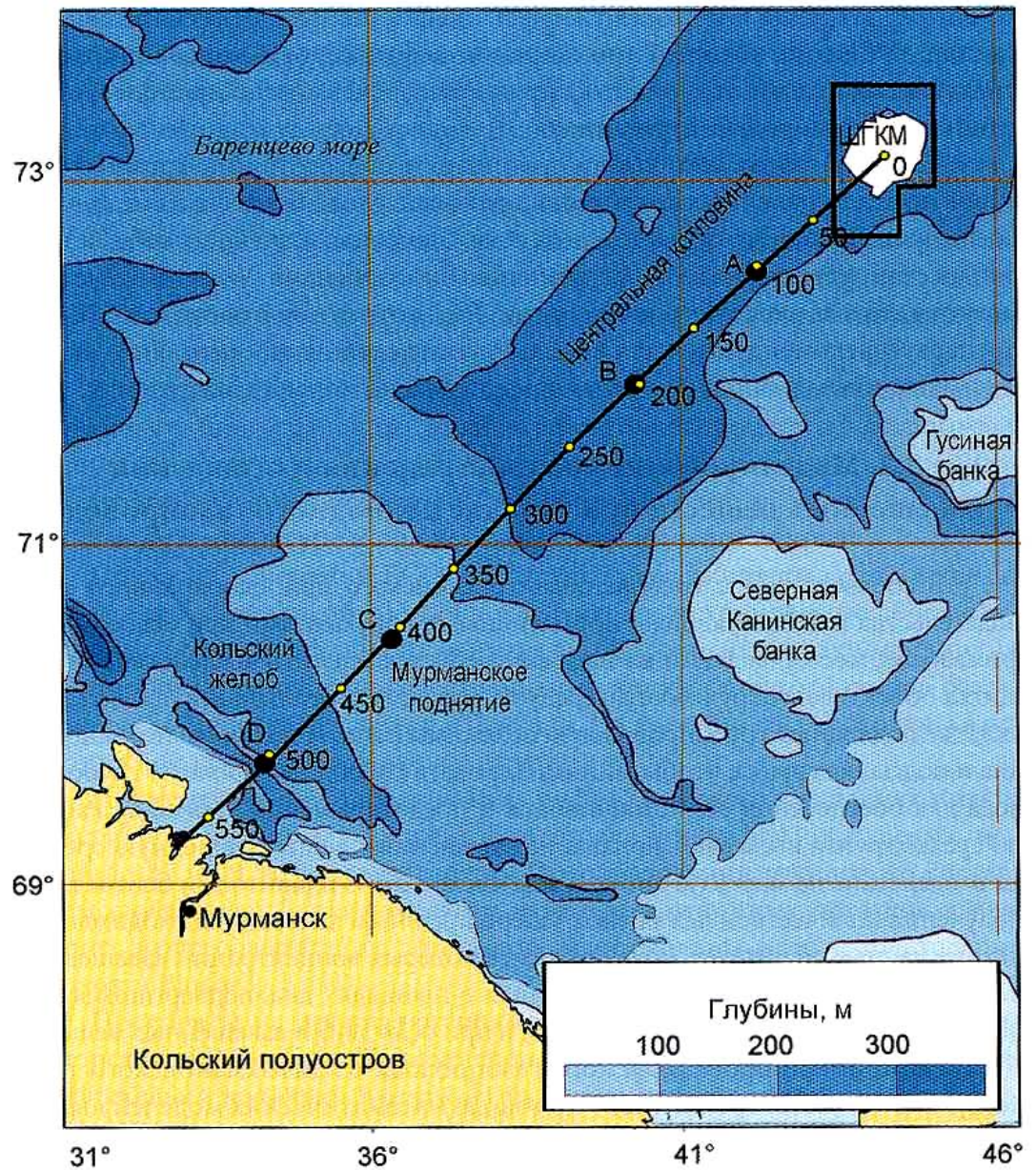


Рис. 73. Трасса подводного газопровода от Штокмановского месторождения (ШГКМ) к Ура-губе. Показаны границы 50-километровых участков газопровода и положение участков А–D (черные кружки), выбранных для расчета распространения взвешенных веществ

Расчет объемов земляных работ (W) и длины траншей (L) для одной нитки газопровода на каждом из участков длиной 50 км для трех вариантов его укладки, отличающихся диаметром труб и рабочим давлением в трубе, выполнило ОАО «Гипроспецгаз». По этим данным и по производительности

можно определить средние площади сечения траншей $\left(S = \frac{W}{L}\right)$ и скорости движения трубозаглубителя $\left(u = \frac{P}{S}\right)$. В таблице 30 приведены эти данные для одной нитки газопровода диаметром 46 дюймов и рабочем давлении газа 15 МПа. При таком варианте прокладки объемы работ и загрязнение будут максимальными. Все дальнейшие расчеты выполнены для одной нитки этого варианта газопровода.

Математические модели. Моделирование выполняли с помощью

Т а б л и ц а 30

Объемы земляных работ при укладке одной нитки газопровода диаметром 46 дюймов и рабочем давлении 15 МПа (три левых столбца – данные проекта на стадии обоснования инвестиций, предоставлены проектировщиком)

Участок газопровода, км	Объем срезки W, м ³	Протяженность срезки L, м	Площадь сечения траншеи S, м ²	Скорость движения трубозаглубителя u, см/с
0–50	952 360	36 770	25.9	0.09
50–100	222 160	18 430	12.0	0.19
100–150	961 150	43 350	22.1	0.10
150–200	97 690	6040	16.1	0.14
200–250	54 460	2030	26.8	0.08
250–300	–	–	–	–
300–350	65 000	1880	34.4	0.06
350–400	13 420	1610	8.3	0.28
400–450	17 170	1930	8.8	0.26
450–500	640	280	2.2	1.01
500–570	854 150	32 830	26.0	0.08
570.0–578.9	–	–	–	–
Всего	3 238 230	145 160	22.3	0.10

программного комплекса CARDINAL (<http://cardinal.x-users.ru>) в трехмерной постановке. Была разработана модель Баренцева моря, по которой определялись нестационарные значения скоростей течений на отдельных вертикалях вдоль трассы газопровода. Средний шаг сетки в этой модели между урочными точками равнялся 19 км. Были учтены все основные факторы, влияющие на течения: ветер, атмосферное давление, приливы, плотностная стратификация вод, потоки на открытых границах Баренцева

моря. Поля температуры и солёности задавали из базы данных Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича, расходы на открытых границах – в основном из работы Х. Лёнига с соавторами (Loeng et al., 1977). Полученные ряды скоростей использовали в локальных моделях отдельных участков газопровода для расчетов распространения взвешенных частиц, где расчетная область имела прямоугольную форму с шагом сетки 10 м для вычисления концентраций. По вертикали во всех моделях задавали 20 узлов, которые сгущались ко дну. Один из придонных узлов находился на расстоянии 1.8 м от дна (высота источника загрязнения).

Система уравнений, которая решается в программном комплексе CARDINAL методом конечных разностей на криволинейной гранично-зависимой сетке (по вертикали после преобразования используется s-координата, обеспечивающая сгущение сетки на мелководе), имеет вид

$$u_t + uu_x + vu_y + wu_z = -g\zeta_x - \frac{g}{\rho_0} \int \rho_x dz - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + fv + K(u_{xx} + u_y) + (v_T u_z)_z, \quad (3.1)$$

$$v_t + uv_x + vv_y + wv_z = -g\zeta_y - \frac{g}{\rho_0} \int \rho_y dz - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - fu + K(v_{xx} + v_{yy}) + (v_T v_z)_z, \quad (3.2)$$

$$u_x + v_y + w_z = \omega_s, \quad (3.3)$$

$$\zeta_t + U_x + V_y = \omega_s, \quad (3.4)$$

$$T_t + (Tu)_x + (Tv)_y + (Tw)_z = \omega_s T_s + K_c(T_{xx} + T_{yy}) + (v_c T_z)_z, \quad (3.5)$$

$$S_t + (Su)_x + (Sv)_y + (Sw)_z = \omega_s S_s + K_c(S_{xx} + S_{yy}) + (v_c S_z)_z, \quad (3.6)$$

$$c_t + (cu)_x + (cv)_y + [c(w - w_0)]_z = \omega_s c_s - \lambda c + K_c(c_{xx} + c_{yy}) + (v_c c_z)_z, \quad (3.7)$$

где u, v, w – декартовы компоненты вектора скорости течения \vec{v} ; $\rho_0(T, S)$ – плотность воды, определяемая по ее температуре T и солёности S по зависимости UNESCO; ρ_0 – среднее значение плотности воды (999.7 кг/м^3); g – ускорение силы тяжести, ζ – уровень свободной поверхности; P_a – атмосферное давление; $f=2\omega \sin\varphi$ – параметр Кориолиса; φ – географическая широта, ω – угловая скорость вращения Земли; K и v_T – коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена, соответственно; U и V – полные потоки; ω_s – объем воды, поступающий в единицу объема за единицу времени из внутренних источников; ω_s – объем воды, поступающей от внутренних источников на единицу поверхности в единицу времени; c – концентрация растворенных или взвешенных примесей; w_0 – скорость осаждения взвешенного вещества (гидравлическая крупность); c_s, T_s и S_s – концентрация примеси, температура и солёность в

воде, поступающей из источников; λ – коэффициент неконсервативности; K_c, v_c – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии. Координата z направлена вертикально вверх.

На дне при $z = -h(x, y)$ задается касательное напряжение трения $\tau_b = (\tau_{b(x)}, \tau_{b(y)})$ с помощью квадратичного закона:

$$\begin{aligned}\tau_{b(x)} &\equiv \rho_0 v_T u_z|_{z=-h} = -\rho_0 f_b u |\bar{v}|, \\ \tau_{b(y)} &\equiv \rho_0 v_T v_z|_{z=-h} = -\rho_0 f_b v |\bar{v}|,\end{aligned}\quad (3.8)$$

где f_b – коэффициент придонного трения.

Для ветровых условий касательное напряжение трения на поверхности $\tau_s = (\tau_{s(x)}, \tau_{s(y)})$ также задается с помощью квадратичного закона:

$$\begin{aligned}\tau_{s(x)} &\equiv \rho_0 v_T u_z|_{z=\zeta} = \rho_a C_D w(x) |\bar{W}|, \\ \tau_{s(y)} &\equiv \rho_0 v_T v_z|_{z=\zeta} = \rho_a C_D w(y) |\bar{W}|,\end{aligned}\quad (3.9)$$

где C_D – ветровой коэффициент; $\bar{W} = (w(x), w(y))$ – скорость ветра на высоте 10 м; $\rho_a = 1.225 \text{ кг/м}^3$ (плотность воздуха).

При наличии ледового покрова касательное напряжение трения на поверхности определяется из соотношений

$$\begin{aligned}\tau_{s(x)} &= -\rho_0 f_{ice} u |\bar{v}| \Big|_{z=\zeta}, \\ \tau_{s(y)} &= -\rho_0 f_{ice} v |\bar{v}| \Big|_{z=\zeta},\end{aligned}\quad (3.10)$$

где f_{ice} – коэффициент трения о лед.

На твердых боковых границах модели нормальная компонента скорости u_n равна нулю. Для тангенциальной компоненты u_τ вводится квадратичный закон трения, аналогичный придонному. Таким образом, граничное условие на твердых боковых границах имеет вид

$$\begin{aligned}\tau_{s(x)} &= -\rho_0 f_{ice} u |\bar{v}| \Big|_{z=\zeta}, \\ \tau_{s(y)} &= -\rho_0 f_{ice} v |\bar{v}| \Big|_{z=\zeta},\end{aligned}\quad (3.10)$$

Одним из граничных условий на открытых боковых границах модели является равенство нулю касательной к границе составляющей скорости течений ($u_\tau = 0$), второе граничное условие может быть разных типов. Для первого типа задается нормальная компонента скорости как функция времени ($u_n = f(t)$), для второго – зависимость уровня воды от времени ($\zeta = \zeta(t)$).

На открытых границах, через которые вода поступает в расчетную область, задается временной ход концентрации примеси, температуры и солёности воды. На открытых границах, через которые вода вытекает из расчетной области, при условии, что адвекция доминирует над диффузией, граничных условий для c, T и S не требуется.

Для скорости оседания взвешенных примесей w_0 принималось, что она сохраняется при достижении примесью дна, таким образом, примесь, достигшая дна, исключалась из расчета. Ресуспензия взвешенных веществ не учитывается.

Для определения коэффициента вертикального турбулентного обмена v_T возможно использование k - ε из модели турбулентности (Prediction..., 1973; Роди, 1984), в которой он определяется из соотношения

$$v_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3.12)$$

где k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций; ε – скорость диссипации этой энергии за счет внутреннего трения; $c_\mu = 0.09$. В программном комплексе CARDINAL уравнения для k и ε решаются без учета адвективных членов, которые имеют второй порядок малости:

$$\begin{aligned} k_t &= (v_T k_z)_z + v_T(P + N) - \varepsilon, \\ \varepsilon_t &= \left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_z\right)_z + \frac{\varepsilon}{k} v_T(c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} N) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

где $P = \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2$, $N = \frac{g}{\rho g_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$, $c_{1\varepsilon} = 1.44$, $c_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $Pr = 0.96$.

Были подобраны (при численных экспериментах) значения $c_{3\varepsilon} = 0.001$ при устойчивой и $c_{3\varepsilon} = 2$ при неустойчивой стратификации.

Для энергии турбулентности и ее диссипации задаются следующие граничные условия:

$$\text{на дне } -b_b = \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}} = \frac{f_b u_b^2}{\sqrt{c_\mu}}, \quad \varepsilon_b = \frac{u_*^3}{k z_b} = \frac{c_\mu^{3/4} k_b^{3/2}}{k z_b}, \quad (3.14)$$

$$\text{на поверхности } -b_s = C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} W^2, \quad \varepsilon_s = \frac{u_*^3}{k z_s} = \frac{c_\mu^{3/4} b_s^{3/2}}{k z_s},$$

где u_* – скорость трения; $k = 0.4$ – постоянная Кармана; z_b и z_s – параметры шероховатости дна и поверхности, соответственно.

Коэффициент горизонтального турбулентного обмена определялся по формуле Смагоринского (Smagorinsky, 1963)

$$K_s = 0.25 \Delta x \Delta y \sqrt{(u_x)^2 + (v_y)^2 + 0.5(v_x + u_y)^2}. \quad (3.15)$$

При решении уравнений трехмерного движения уровень определяем из уравнений небольших глубин. Придонное трение в этих уравнениях берем из решения трехмерной задачи.

В модели Баренцева моря (А.С. Аверкиев, К.А. Клеванный, собственные данные) решали уравнения (3.1)–(3.6), (3.12), (3.13), (3.15) с граничными условиями (3.8)–(3.11), (3.14), а в локальных моделях решали уравнение (3.7) с заданными значениями скоростей.

Исходные данные и процедура расчета полей мутности. Для расчетов распространения полей мутности было выбрано четыре небольших участка (А, В, С, D), расположенных вдоль трассы (рис. 73). Участки А и В находятся в Центральной впадине (Южно-Баренцевская синеклиза), участок С – на Мурманской возвышенности (Мурманский вал), участок D – в районе Кольского желоба. Глубины в пределах каждого из участков (А, В, С, D) меняются мало и в моделях заданы постоянными величинами 293, 320, 170 и 172 м, соответственно. Содержание пелита в них составляет 60, 63, 23 и 65 %. Необходимо было рассчитать объемы воды с концентрациями взвешенных частиц, превышающими 10, 100 и 1000 мг/л. Предварительные расчеты показали, что только фракция пелита оказывает влияние на эти объемы. Облака взвешенных частиц от остальных фракций локализируются внутри облака мутности пелита.

При расчетах было принято, что весь поднятый со дна пелит перейдет во взвесь, так как более конкретные данные о поведении облака взвеси при работе трубозаглубителей отсутствуют. Это предположение означает, что расчетные данные являются оценкой сверху. Мощность источника загрязнения составит тогда для участков: А – 21, В – 22, С – 8 и D – 23 кг/с. Средняя длина участка, на котором будет выполняться непрерывная срезка грунта, составляет, согласно данным, 250 м.

С помощью модели Баренцева моря были выполнены расчеты нестационарной трехмерной динамики моря за произвольно выбранный период времени – со 2 по 9 июня 2005 г. При расчете происходила запись значений скоростей на участках А, В, С, D на всех 20 горизонтах с шагом 240 с. Расчетные траектории течений на всех горизонтах участка В и в придонном слое на всех участках показаны на рисунке 74.

Полученные ряды скоростей течения $\vec{v}(z, t)$ импортировали в локальные модели участков А–D. Скорости течений в локальных моделях зависели от вертикальной координаты и времени, но не зависели от горизонтальных координат. Такое положение вполне допустимо в связи с небольшой (порядка 10 км) протяженностью моделируемых участков по сравнению с масштабами Баренцева моря.

В локальных моделях задавали движение источника загрязнения на расстоянии 1.8 м от дна в пределах участка длиной 250 м со скоростью 0.5 см/с, после чего действие источника прекращалось, но расчет продолжался до момента, когда объем пятна с концентрацией 10 мг/л достигал максимального значения, а для участка В расчет был продолжен до мо-

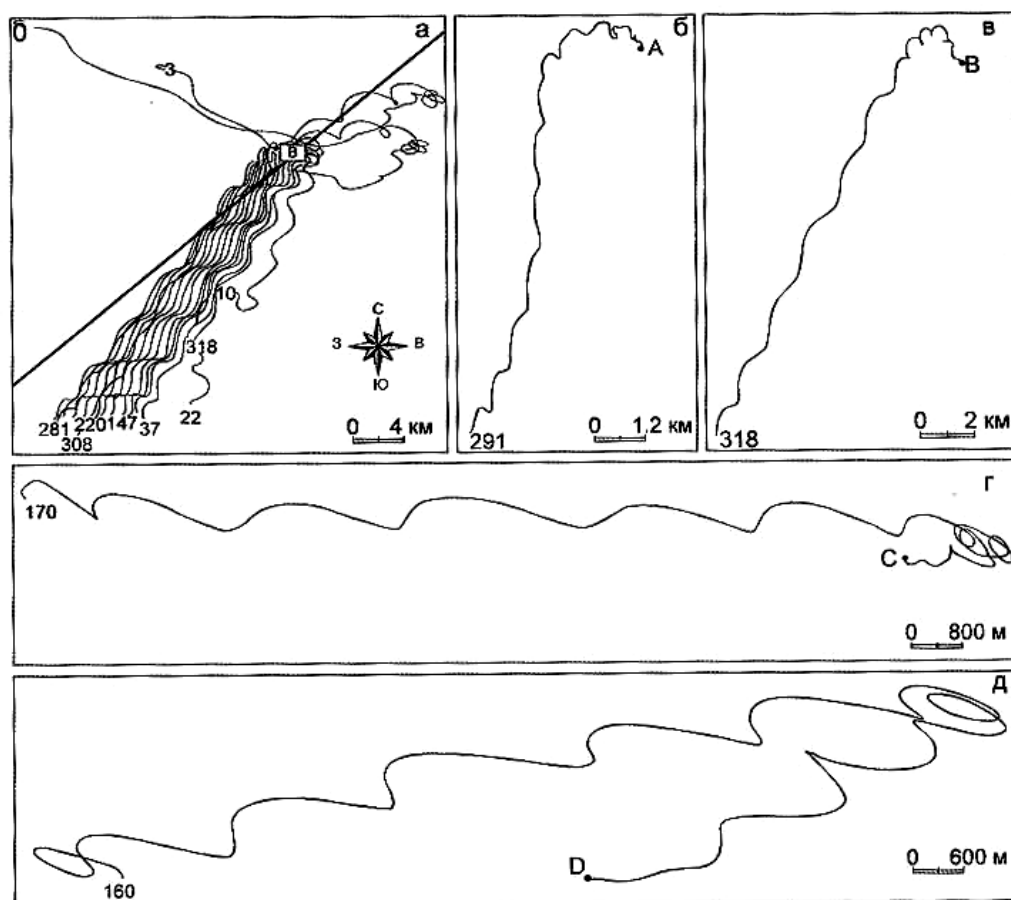


Рис. 74. Расчетные траектории частиц с 2 по 9 июня 2005 г. на участке В на всех 20 горизонтах (1), на участках А–D в придонном слое (1.8 м от дна) (2–5). Цифры у траекторий – глубина, м

мента, когда во всей расчетной области концентрации стали ниже 10 мг/л. Положение источника в локальной модели и ее протяженность задавались с учетом направления основного дрейфа в придонных слоях в этот период, полученного по модели Баренцева моря. Импортирование рядов скоростей позволяет проводить расчеты по локальным моделям с достаточно большим шагом по времени (около 1 ч), но тестовые расчеты показали, что необходимая точность расчетов (погрешность менее 10 %) достигается при шаге не более 60 с. Поэтому расчеты проводили с шагом 60 с. Сложность расчетов состояла в том, что их необходимо было выполнять с очень маленьким шагом сетки (10 м) в области с размером в несколько километров (область возможного дрейфа пятна мутности до его исчезновения). Расчетная сетка локальных моделей состояла из примерно $4 \cdot 10^5$ узлов на каждом из 20 горизонтов.

Диаметр частиц пелита задавался равным 0.005 мм. При принятой температуре воды 3 °С скорость оседания частиц пелита, согласно принятой в CARDINAL расчетной зависимости, равна $w_0 = 0.015$ мм/с (Дроздов, 1987).

В локальных моделях было принято постоянное значение для коэффициента вертикальной турбулентной диффузии v_c равное $2 \text{ см}^2/\text{с}$. Использование в локальных моделях независимых от горизонтальных координат скоростей не позволяет применить для расчета горизонтальной диффузии формулу Смагоринского (3.15), в которую входят горизонтальные градиенты составляющих вектора скорости. Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии определялся по данным экспериментальных исследований, в которых в качестве определяющего параметра брался горизонтальный масштаб явления: $K_c = \gamma L^{4/3}$, $\gamma = 0.05 \text{ см}^{2/3}\text{с}^{-1}$ (Кремзер, Озмидов, 1977). При характерном масштабе 100 м получим, что $K_c = 500 \text{ см}^2/\text{с}$.

Для каждого из четырех участков определяли следующие параметры: 1) максимальные по времени объемы воды (V), в которых концентрации взвешенных веществ, образующихся при разработке одной траншеи длиной 250 м, превышали 10, 100 и 1000 мг/л; 2) объемы пространства ΣV , через которые перемещалась вода с взвешенными частицами в концентрации более 10, 100 и 1000 мг/л.

Результаты расчета полей мутности. Рассмотрим результаты, полученные для участка В, расположенного в Центральной впадине Баренцева моря, глубина – 320 м. Согласно расчетам, 2 июня и утром 3 июня 2005 г. течения в придонном слое на этом участке были в основном направлены на северо-восток, а далее – на юго-запад (рис. 74). Скорости в придонном слое варьировали до 10 см/с. Источник задавался движущимся вдоль трубы в северо-восточном направлении на расчетном горизонте 19, который располагался на глубине 318.2 м, т. е. на расстоянии 1.8 м от дна. Мощность источника загрязнения по пелиту для этого участка, как отмечалось, равна 22 кг/с (63 % от 35 кг/с). Рассчитывали распространение взвеси, поднятой при разработке траншеи длиной 250 м. При скорости 0.5 см/с для этого потребуется 13 ч 53 мин. Трубозаглубитель при этом поднимет 1166 м³ грунта, из которых в данном случае 735 м³ (1166×0.63), или 1 102 500 кг приходится на долю пелита.

В момент окончания работ на участке (13 ч 53 мин 2 июня 2005 г.) концентрация взвеси в центре пятна равнялась 1700 мг/л. На рисунке 75 показана эволюция пятна (концентрация > 10 мг/л) в придонном слое после окончания работ (8 ч 26 мин 5 июня 2005 г.). В период производства работ пятно имело вытянутую форму, но за счет однородности полей скорости, приобрело круглую форму. Облако взвешенных частиц сначала “проплыло” в соответствии с направлениями течений немного на северо-восток, а затем на юго-запад. Продолжение расчетов показало, что облако с концентрациями более 10 мг/л просуществовало 6.5 сут., проплыв на юго-запад примерно 16 км.

На рисунке 76 представлен вертикальный разрез, проходящий через центр пятна в 8 ч 26 мин 5 июня 2005 г. Согласно расчетам, пятно в этот момент находилось в придонном слое воды на 20 м от дна.

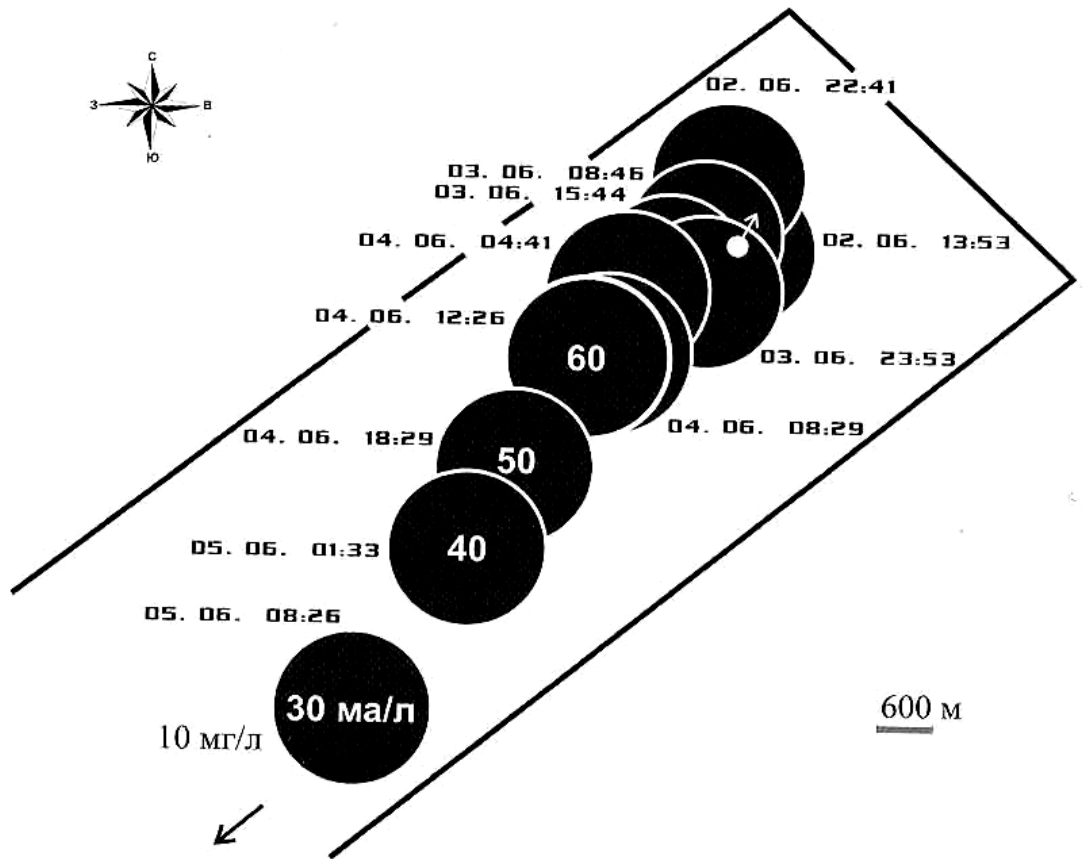


Рис. 75. Положение облака взвешенного вещества с концентрацией > 10 мг/л в придонном слое на участке В (рис. 74) с 13 ч 53 мин 2 июня (момент окончания работ) до 8 ч 26 мин 5 июня. Стрелкой показан путь трубозаглубителя. В центре облаков показаны максимальные на данный момент времени концентрации, мг/л

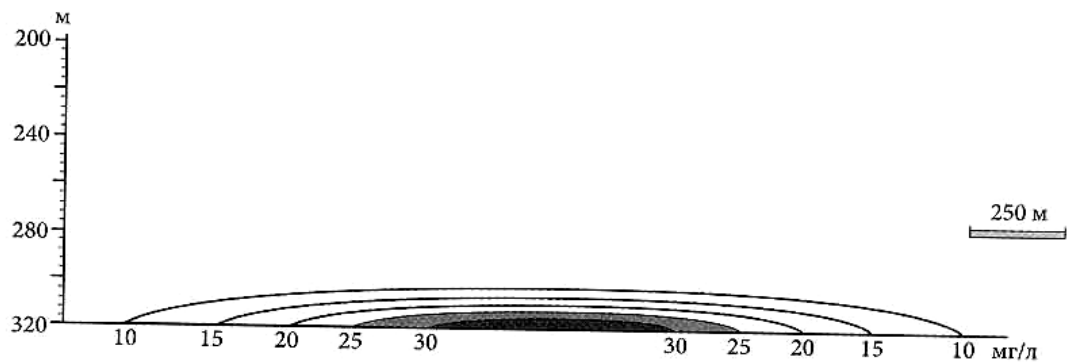


Рис. 76. Изолинии концентрации взвешенного вещества на вертикальном разрезе, проходящем через центр облака в 8 ч 26 мин 5 июня (через 67.5 ч после начала работ) на участке В (рис. 74)

Временные изменения объемов воды, в которых на каждый момент времени концентрации превышали 10, 100 и 1000 мг/л, показаны на рисунке 77. Максимальный объем облака с концентрацией взвешенных частиц более 10 мг/л (28 млн м³) отмечен через 52 ч после начала работ. Концентрации повсеместно стали менее 10 мг/л только через 6.5 сут. Максимальный объем облака с концентрацией выше 100 мг/л был примерно в момент окончания работ – 3.6 млн м³. Через 40 ч после начала работ концентрации повсеместно стали менее 100 мг/л. Максимальный объем облака с концентрацией более 1000 мг/л также был в момент окончания работ – 0.12 млн м³. Через 16 ч после начала работ концентрации повсеместно стали менее 1000 мг/л.

За 6.5 суток существования облака с концентрацией взвешенных частиц выше 10 мг/л на участке В им было “загрязнено” 484 млн м³ водного пространства, за 40 ч с концентрацией выше 100 мг/л – 18.4 млн м³, а за 16 ч с концентрацией более 1000 мг/л – 0.36 млн м³.

Для остальных участков расчеты не были доведены до момента исчезновения концентраций 10 мг/л. Для концентраций 100 мг/л время существования составило: А – 38 ч, С – 18 ч, D – 32 ч. Минимум времени для участка С очевидно связан с относительно небольшим содержанием пелита. Для концентраций 1000 мг/л время существования оказалось примерно одинаковым и мало зависело от доли пелита (А и С – 14 ч, D – 15 ч). Отметим, что время оседания частиц, поднятых на высоту 1.8 м от дна при скорости оседания 0.015 мм/с без учета турбулентности составляет 33 ч.

После выполнения расчетов для каждого из участков определяли удельные (на 1 м³ поднятого пелита) значения объемов облаков взвешенных частиц и объемов загрязненного водного пространства с заданными значе-

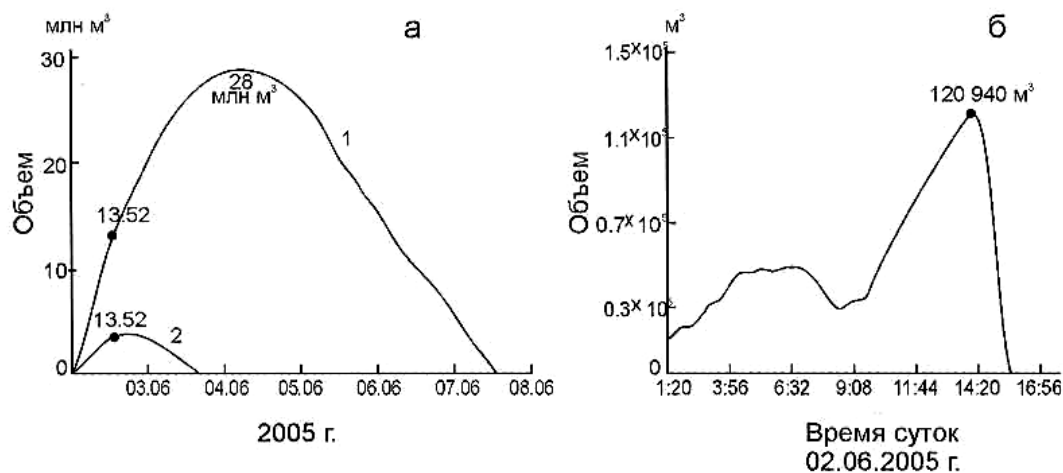


Рис. 77. Изменение объема облаков взвешенного вещества, в которых концентрации превышали 10 (1) и 100 (2) мг/л (а) и 1000 мг/л (б), при разработке траншеи длиной 250 м на участке В (рис. 74). Черная точка – время окончания работы

ниями концентраций. По этим данным и данным по объемам поднятого на участке пелита, в предположении, что облака не пересекутся, определяли суммарные для каждого из 50-километровых участков объемы пятен и объемы загрязненного водного пространства. Затем суммированием полученных значений для 50-километровых участков определяли общие для всей трассы газопровода объемы облаков взвешенных частиц и объемы загрязненного водного пространства. Так, при укладке одной нитки газопровода диаметром 46 дюймов и рабочем давлении 15 МПа суммарный объем облаков мутности с концентрацией взвешенных частиц более 10 мг/л оценивается в 52 827 млн м³, с концентрацией более 100 мг/л – 6540 млн м³, с концентрацией выше 1000 мг/л – 156 млн м³.

Расчет площади поврежденного дна. Площадь дна, покрытая слоем грунта толщиной больше 5 мм, – параметр, необходимый для расчета ущерба рыбным запасам. В настоящей работе не учитывали площадь дна, поврежденного подсыпкой гравия в свободные пролеты подводного трубопровода. Уменьшение глубины из-за оседания взвешенных частиц грунта определяли по уравнению

$$h_t = -\frac{w_0 c |z|}{\rho_s}, \quad (3.16)$$

где $\rho_s = 2650 \text{ кг/м}^3$ – плотность осаждающихся частиц грунта. В результате расчетов получено, что при выпадении перешедшего во взвесь пелита толщина слоя осадков нигде не превысила 5 мм. Так, для участка В максимальная толщина составила только 0.2 мм. Таким образом, только крупные фракции грунта при разработке траншеи дают слой толщиной более 5 мм.

При отсутствии данных наблюдений о форме отвала представляется разумным принять, что отброшенный грунт, оставшийся после перехода во взвесь пелита, представляет собой в сечении равнобедренный треугольник с углом основания 30°. Его площадь s равна $\frac{bh}{2} = b^2 \frac{1}{4} \text{tg} \alpha$, где b – ширина отвала, $h = b \frac{1}{2} \text{tg} \alpha$ – высота отвала, $\alpha = 30^\circ$. Тогда для каждого из 50-километровых участков ширину отвала можно определить из соотношения $b = 2 \sqrt{\frac{s}{\text{tg} \alpha}}$. Площадь s определяется для каждого участка из $s = \frac{V(1-k)}{L}$ где V – объем срезки на участке, k – доля пелита, L – длина срезки на участке. Площадь дна, покрытая отвалом, на участке длиной L составит $S_0 = bL = 2 \sqrt{\frac{VL(1-k)}{\text{tg} \alpha}}$. К этой площади надо добавить площадь поверхности дна, занятого траншеей (она равна ширине газопровода) и поврежденную гусеницами трубозаглубителя $S_1 = (1+2r)L$, где l – ширина

участка дна, занятого газопроводом, и равная ширине траншеи; r – ширина гусениц, принятая равной 60 см. При расчетах земляных работ было принято, что при укладке газопровода происходит его заглубление на половину диаметра трубы. Кроме того, для обеспечения устойчивости газопровода на морском дне и противодействия придонным течениям и волнам предусмотрено нанесение на него бетонного покрытия. Далее при расчетах учитывали наружный диаметр труб для каждого из участков D и толщину бетонного покрытия b_{con} . Очевидно, что $l = D + 2b_{\text{con}}$. Следовательно, для площади поврежденного дна (площади, на которой гибнет зообентос) на участке длиной L получим

$$S = 2 \sqrt{\frac{VL(1-k)}{\text{tg } \alpha}} + (D + 2b_{\text{con}} + 2r)L. \quad (3.17)$$

Так, для одной нитки газопровода диаметра 46 дюймов ($P_{\text{раб}} = 15$ МПа) площадь поврежденного дна оценивается в 1 261 310 м².

При выполнении настоящей работы приходилось использовать большое количество различных допущений и предположений. Это было связано иногда с отсутствием необходимых экспериментальных данных или данных проекта, а также с очень большим количеством дополнительных расчетов, которые необходимо было бы сделать. Для уточнения результатов следует:

- получить более точные данные о ширине и глубине траншей, в том числе в прибрежной части;
- получить более детальные сведения о содержании пелита и других легких фракций вдоль трассы трубопровода;
- определить, какие фракции грунта переходят во взвесь при работе различных типов заглубителей и кабелеукладчиков;
- определить форму грунта в отвале.

На основании результатов расчетов распространения взвешенных частиц грунта при работе трубнозаглубителя по укладке подводного трубопровода можно сделать следующие выводы.

1. Объемы облаков взвешенных частиц грунта, образующихся при срезке неровностей дна во время работы трубнозаглубителя, укладываемого подводный газопровод, локализуются вблизи дна, поднимаясь от его поверхности не более чем на 20–30 м (изолинии концентрации 10 мг/л).

2. Облака с повышенным содержанием взвешенных частиц грунта могут перемещаться на значительные расстояния от места возникновения (для поля с минимальной концентрацией в 10 мг/л до полутора десятков километров). Облака с высокой концентрацией взвешенных частиц успевают переместиться придонными течениями на меньшие расстояния.

3. Время существования полей повышенной концентрации взвешенных частиц при срезке длиной до 250 м зависит от доли пелита в разрабатываемом грунте и составляет порядка 5–6 сут. для концентраций 10 мг/л

и 18–40 ч – для 100 мг/л. Для поля концентраций более 1000 мг/л время существования облака оказалось практически не зависящим от доли пелита. Оно определяется временем оседания и составляет 14–16 ч.

4. Объемы полей взвешенных частиц определяются долей пелита в поднятом грунте, а также скоростями течений. Скорости на выбранных участках были примерно одинаковыми, поэтому зависимость от них не была выявлена. Однако следует заметить, что сначала с увеличением скоростей будет происходить увеличение объемов, но после достижения некоторого значения скоростей объемы начнут уменьшаться из-за того, что концентрации станут повсеместно ниже заданных величин.

5. Покрытие дна слоем грунта толщиной более 5 мм (параметр, принимаемый при расчетах ущерба рыбным запасам от гибели бентоса) обусловливается в основном отвалом грунта при рытье траншеи. Слой осадка, образующийся при осаждении пелита, значительно меньше 5 мм.

6. Более корректный расчет полей мутности, времени их существования и толщины выпадающих осадков может быть сделан на основе более полных данных по трубозаглубителю, гранулометрическому составу грунта не только для верхнего слоя донных осадков, но и глубже – порядка нескольких метров от поверхности дна. Последние данные могут быть получены только на основе результатов подробных инженерно-геологических изысканий.