

УДК 502/504:551.468.3

Н. Н. ГРИШИН, И. И. ГРИЦУК, В. К. ДЕВОЛЬСКИЙ

Институт водных проблем РАН

Н. К. ПОНОМАРЁВГосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Российский университет дружбы народов»**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ВЗВЕСИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ
ПРИ ОТСЫПКЕ ГРАВИЯ ДЛЯ ПРОКЛАДКИ МОРСКИХ
ГАЗОПРОВОДОВ**

Дано описание и приведены результаты экспериментов, имеющих целью определить, как формируются ареалы мутности из тонкодисперсных донных отложений, поднятых сбрасываемой на дно гравийной смесью, предназначенной для обеспечения эксплуатационной надежности морских газопроводов.

Наносы, ареалы мутности, тонкодисперсные донные отложения, морские газопроводы.

There is given a description and results of the experiments aiming at determination how turbidity areal is formed from the fine-dispersed bottom sediments lifted by the gravel mixture dumped to the bottom, which is purposed for providing operational reliability of sea gas pipelines.

Sediments, turbidity areal, fine-dispersed bottom sediments, sea gas pipeline.

При строительстве морских трубопроводов, как и любых объектов, оказывающих влияние на водную среду, должна проводиться предварительная оценка такого воздействия и разработка мер, сводящих это воздействие к минимальному значению. Основным фактором воздействия строительства морских газопроводов на водную среду и потенциальным источником трансграничного переноса является подготовка морского дна для укладки трубопровода. Эта подготовка заключается в сооружении гравийных опор в углублениях дна с целью недопущения провисания трубопровода. Далее осуществляется засыпка трубопровода гравием для достижения устойчивости трубы при транспортировке газа, температура которого на начальном участке трассы газопровода, как правило, выше температуры окружающей среды вследствие повышенного давления транспортируемого газа [1]. При проведении отсыпок гравия частицы донных отложений переходят во взвешенное состояние, образуя облака мутности, от области распространения и времени существования которых зависит масштаб воздействия на водную среду.

В настоящей статье приведены результаты экспериментального исследо-

вания высоты поднятия над дном и времени существования облаков мутности, возникающих в результате проведения отсыпок гравийных опор, применительно к условиям строительства российской части морского газопровода «Северный поток» через Балтийское море. Экспериментальная часть работ осуществлялась в лаборатории гидравлики Российского университета дружбы народов [2]. Условия взаимодействия падающих зерен гравия с дном соответствовали реальным условиям будущего строительства гравийных опор газопровода «Северный поток», а именно:

а) гранулометрический состав донного грунта соответствовал гранулометрическому составу донных отложений Балтийского моря в районе острова Гогланд. Ожидается, что здесь отсыпка гравийных опор при строительстве газопровода может вызвать наиболее интенсивный переход во взвешенное состояние частиц донных наносов [3];

б) гранулометрический состав гравийной смеси, используемой в экспериментах, соответствовал гранулометрическому составу гравийной смеси, которую предполагается использовать при создании гравийных опор газопровода [4].

Эксперименты проводились по заданию компании Nord Stream AG для

проверки результатов, полученных с помощью математического моделирования распространения наносов при строительстве гравийных опор, в рамках Национальной процедуры оценки воздействия на окружающую среду и Международной процедуры оценки трансграничного воздействия в соответствии с положениями Конвенции Эспо [3, 4].

Сопоставление принципов и результатов моделирования распространения взвеси, перешедшей во взвешенное состояние в процессе сооружения гравийных опор, показало следующее: при общем выводе об отсутствии трансграничного переноса в период строительства газопровода в работах [3, 4] использовались различные начальные и граничные условия для моделирования транспорта наносов. В частности, отличались значения таких важнейших параметров моделирования, как коэффициент взмучивания наносов K_H (отношение массы взвешенных при падении гравия на дно наносов к массе гравия, сброшенного на единицу площади дна) и высота подъема над дном облаков мутности H_S , (расстояние от дна до точки, в которой концентрация донных отложений, перешедших во взвешенное состояние в результате падения на дно частиц гравия, составляет заданную величину C_S).

При математическом моделировании процесса транспорта частиц наносов, выполненном компанией Ramboll (Дания) для всего участка трассы газопровода, принималось, что высота подъема над дном облаков мутности H_S равняется 2,0 м [3, 5]. При моделировании распространения наносов в российской части газопровода (моделирование выполнено в Вычислительном центре РАН им. А. А. Дородницына) значение H_S принималось равным 5...10 м [4].

Оценка высоты поднятия над дном облаков мутности. Детальное описание методики экспериментов и результатов исследования одного из важнейших параметров взаимодействия падающих гравийных зерен с дном – коэффициента взмучивания наносов K_H – приведено в [2]. Необходимо отметить, что для проведения экспериментов была создана экспериментальная установка, представляющая собой сосуд высотой 2,0 м прямоугольного сечения (0,40 x 0,35) м,

выполненный из оргстекла, снабженный устройствами для отбора проб взвешенных наносов, наполнения сосуда водой из водопровода и ее слива без нарушения установленной на дно кассеты, наполненной исследуемыми донными отложениями.

Кассета высотой 0,05 м во время экспериментов заполнялась грунтом, гранулометрический состав которого соответствовал донным отложениям Балтийского моря в районе острова Гогланд. Наряду с гранулометрическим составом донных отложений, аналогичных натурному составу, при проведении экспериментов использовался и гранулометрический состав гравийной смеси, максимально приближенный к натурным условиям. Гравийная смесь сбрасывалась с различных высот от дна, начиная с высоты 1,8 м, как и предполагалось осуществлять при прокладке газопровода «Северный поток». Таким образом, с учетом идентичности натурным условиям состава донных отложений и гравийной смеси масштаб экспериментов соответствовал натуре, как 1:1.

Всего было проведено девять серий опытов, в которых гравийная смесь сбрасывалась на дно сосуда через трубу диаметром 0,11 м, устанавливаемую на различных расстояниях H_0 от дна. Процесс падения зерен гравия и взмучивания грунта снимали двумя кинокамерами: одной кинокамерой снимали процесс падения зерен гравия и взмучивания донных отложений по всей высоте сосуда, а второй – процесс, происходящий в придонной области.

В различных сериях экспериментов использовали три отличающихся по массе ($M_{gr} = 1000, 2000$ и 4000 г), но идентичных по гранулометрическому составу набора гравийной смеси, которые сбрасывались через трубу, устанавливаемую на различных расстояниях над дном трубы ($H_0 = 0,60; 1,20$ и $1,80$ м). После сбрасывания в сосуд гравийной смеси проводили отбор проб воды, содержащих взмученные со дна частицы донных отложений, вакуумным батометром на шести горизонтах (на расстоянии от дна, равном 0,06; 0,12; 0,24; 0,48; 0,96 и 1,44 м). Отбор проб проводили непосредственно после сбрасывания частиц гравия, а затем с интервалами 15, 30, 60, 90, и 120 мин.

Объем каждой пробы взвесенесущей среды составлял 0,17 л. Пробы фильтровались

через предварительно высушенные и взвешенные на аналитических весах ядерные фильтры диаметром 35 мм. Аналитические весы поверяли перед взвешиванием фильтров каждой серии экспериментов.

Оценка точности полученных экспериментальных данных показала, что в области наиболее часто встречающихся в эксперименте значений концентрации взвешенных наносов ($C_s = 50 \dots 250$ мг/л) максимальные абсолютные ошибки определения единичных концентраций взвеси находились в диапазоне $\Delta(C_s) = 1,5 \dots 2,8$ мг/л; при этом относительные максимальные ошибки определения концентрации взвеси укладывались в диапазон $\Delta(C_s)/C_s = 1,1 \dots 3,0$ %.

Высота подъема над дном облаков мутности в обеих моделях строго не определялась, т.е. не указывалось точное значение концентрации C_s донных отложений, перешедших во взвешенное состояние в результате падения на дно частиц гравия [4, 5].

Введем численное определение этого понятия. Будем считать, что высота подъема над дном «облаков мутности» H_s – это расстояние от дна до горизонта над дном, на котором концентрация донных отложений, перешедших во взвешенное состояние в результате падения на дно частиц гравия, составляет некую заданную величину C_s [мг/л]. Для оценки граничного значения концентрации используем величину $C_s = 10$ мг/л, соответствующую российским нормам предельно допустимой концентрации взвеси для шельфовой зоны морей с глубинами более 8 м [6].

Соответствующие значения H_{s10} назовем высотой подъема над дном облаков мутности, т.е. это расстояние от дна до точки, в которой концентрация донных отложений, перешедших во взвешенное состояние в результате падения на дно

частиц гравия, составляет 10 мг/л.

Значения H_{s10} определяли следующим образом (табл. 1): проводили сглаженную кривую $C_s(h)$ и определяли точки ее пересечения со значениями концентрации, равными $C_s = 10$ мг/л (с учетом значений фоновых концентраций C_{s0} , отличающихся в различных экспериментах [2]), т.е. определяли точки пересечения графика $C_s(h)$ с прямыми, исходящими из точек оси ординат со значениями $C = C_{s = 10 \text{ мг/л}} + C_{s0}$. Значение фоновой концентрации определяли по содержанию тонкодисперсных частиц в гранулометрическом составе гравийной смеси, которые всегда в ней присутствуют в соответствии с технологией приготовления гравийной смеси.

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что высота подъема облаков мутности над дном потока при граничном значении концентрации $C_s = 10$ мг/л для всех экспериментов ($H_0 = 0,60$; 1,20 и 1,80 м; $M_{gr} = 1000$; 2000 и 4000 г) не превышает величины $H_s = 1,1$ м, т.е. намного ниже значений этой величины, используемой в модели фирмы Ramboll и равной 2,0 м [3, 5], а также в модели Вычислительного центра РАН, в которой $H_s = 5 \dots 10$ м [4]. Отсюда следует, что реальное воздействие на водную среду в части формирования облаков мутности по высоте их подъема над дном при отсыпке гравийной смеси для создания опор газопровода будет существенно меньше того, которое оценивалось по результатам математического моделирования этого процесса с использованием обеих вышеуказанных моделей [3–5].

Оценка времени существования облаков мутности. Для определенности будем считать, что временем существования облаков мутности T_s является

Таблица 1

Значения высоты над дном верхней границы облаков мутности H_{s10} при граничной концентрации взвеси $C_s = 10$ мг/л. Высота над дном верхней границы облаков мутности H_{s10} , м

Высота сброса гравийной смеси над дном H_0 , м	Масса сбрасываемого гравия M_{gr} , г		
	1000	2000	4000
1,80	0,41 ± 0,02	0,92 ± 0,02	0,95 ± 0,02
1,20	0,78 ± 0,02	0,97 ± 0,02	1,07 ± 0,02
0,60	0,77 ± 0,02	0,71 ± 0,02	0,96 ± 0,02

временной интервал, в течение которого общая масса донных отложений, перешедших во взвешенное состояние в результате удара частиц гравия о дно, уменьшилась не менее чем в пять раз, т. е. $M_s(t = T_s) \leq 0,2M_s(t = 0)$.

Значения определенных таким образом величин $M_s(t)$ для всех серий экспериментов были вычислены по экспериментальным зависимостям концентрации взвешенной среды от расстояния от дна потока (табл. 2, рис. 1) [2].

Таблица 2

Изменение со временем после сброса гравия массы донных отложений $M_{st}(H_0, M_{gr}, t)$, перешедших во взвешенное состояние

Масса сбрасываемого гравия M_{gr} , г	Высота сброса гравия над дном H_0 , м	Время после сброса гравия t , мин				
		0	15	30	60	120
1000	0,60	8,66	2,75	1,57	1,13	1,02
	1,20	6,49	2,07	1,27	0,76	0,56
	1,80	3,83	1,13	0,83	0,62	0,52
2000	0,60	11,88	2,99	1,68	0,94	0,48
	1,20	8,12	2,86	1,55	0,92	0,55
	1,80	4,96	1,39	0,73	0,52	0,51
4000	0,60	18,94	7,60	3,69	2,69	2,04
	1,20	16,74	7,48	4,97	2,82	1,76
	1,80	13,04	4,62	2,95	1,60	1,17

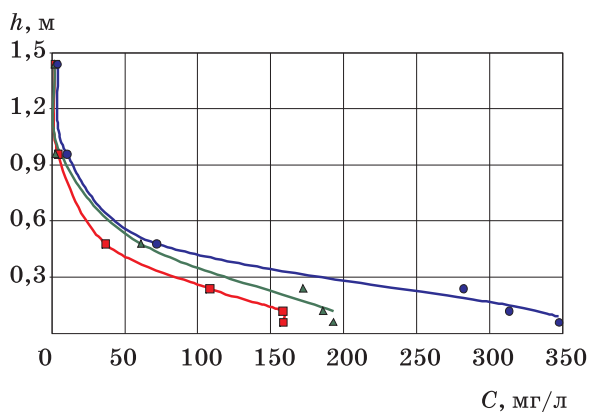


Рис. 1. Вертикальное распределение концентрации взвешенных наносов $C_s(h, M_{gr}, H_0 = 0)$ сразу после сброса гравийной смеси различной массы с высоты $H_0 = 0,6$ м [2]: $M_{gr} = 1000$ г ■; 2000 г ▲; 4000 г ●

Общую массу донных отложений, перешедших во взвешенное состояние в результате удара частиц гравия о дно, можно назвать массой облака мутности. Ее вычисляли путем суммирования массы взвеси M_i в слоях толщиной Δh , (площадь равна площади кассеты с донными отложениями: $S_{exp} = 0,14$ м²), а средняя по слою концентрация взвеси равна C_i : $M_i = C_i \cdot \Delta h \cdot S_{exp}$.

При этом первоначальная масса облака мутности $M_s(t = 0)$ в нулевой

момент времени (т.е. сразу после удара о дно частиц гравия) зависит от массы сбрасываемого гравия M_{gr} при всех высотах его сброса H_0 : чем больше сбрасывается гравия, тем больше взмучивается донных наносов (см. табл. 2).

Зависимость величин $M_s(t = 0)$ от высоты сброса не столь очевидна – она имеет обратно пропорциональный характер: максимальное значение $M_s(t = 0)$ достигалось при минимальной высоте сброса гравия $H_0 = 0,60$ м, а минимальное значение $M_s(t = 0)$ – при максимальной высоте его сброса $H_0 = 1,80$ м.

По мнению авторов, существенную роль в выявленной закономерности играет процесс гидравлической сортировки частиц во время их падения [2]. Падающие с большей высоты частицы гравия успевают рассортироваться по размерам и скоростям падения. При этом возникает эффект «защитного слоя» или своеобразной «отмостки»: донные частицы выбиваются из грунта лишь первыми из падающих на дно частиц, а некоторая часть частиц, упавших на дно позже, попадает на участки дна, ранее уже покрытые упавшими частицами гравия, поэтому они оказывают меньшее воздействие на переход донных частиц во взвешенное

состояние. Это явление, по-видимому, заслуживает дальнейшего изучения.

С течением времени после падения на дно частиц гравия масса облака мутности $M_S(t)$ уменьшается (см. табл. 2). Для изучения закономерностей этого процесса лучше использовать графики изменения со временем величины относительной массы облака мутности $M_{отн}(t)$. Эта величина зависит не только от времени t , прошедшего после начала процесса осаждения взвешенных наносов, составляющих облако мутности, но и от начальных условий эксперимента (высоты сброса частиц гравия H_0 и массы этих частиц $M_{гр}$), т.е.

$$M_{отн}(t) = M_S(H_0, M_{гр}, t) / M_S(H_0, M_{гр}, t = 0).$$

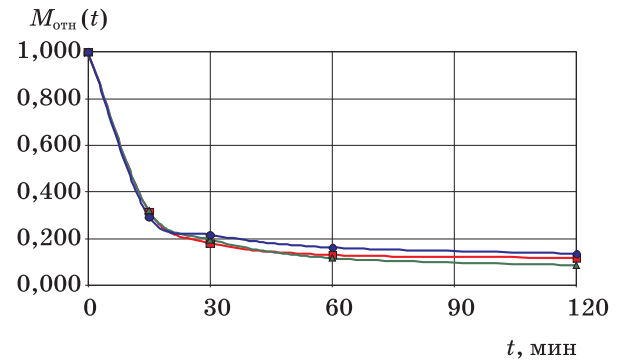
Совмещенные графики, на которых нанесены зависимости $M_{отн}(t)$, полученные в опытах, в которых масса гравия 1000 г сбрасывалась с высот $H_0 = 0,60; 1,20$ и $1,80$ м, показывают, что значение относительной массы облака мутности $M_{отн}(t = 30 \text{ мин})$ равно $0,20 \pm 0,02$ спустя 30 мин после начала эксперимента (рис. 2а).

Аналогичная картина наблюдается в случае сброса с вышеуказанных трех высот гравийных частиц массой 2000 г (рис. 2б). В случае сброса с данных высот гравийной смеси массой 4000 г значения относительной массы облака мутности укладываются в диапазон $0,20...0,25$ (рис. 2в).

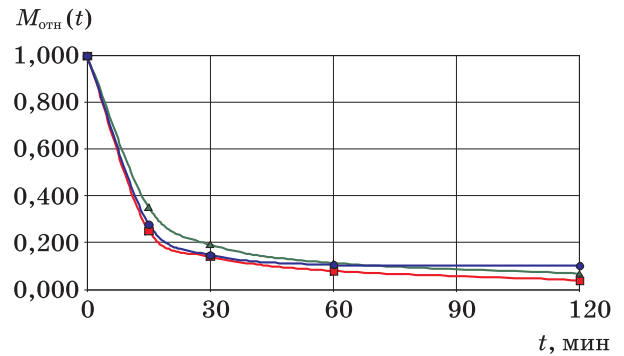
Следует отметить, что во всех экспериментах спустя 60 мин после сброса гравия значения $M_{отн}(t)$ были меньше определенного граничного значения для области существования облаков мутности T_S : $M_{отн}(t = T_S = 60 \text{ мин}) \leq 0,2$. Более наглядно этот вывод следует из анализа совмещенных графиков: $M_{отн}(t) = M_S(H_0, M_{гр}, t) / M_S(H_0, M_{гр}, t = 0)$ при $H_0 = 0,60; 1,20$ и $1,80$ м и $M_{гр} = 1000; 2000$ и 4000 г (рис. 3).

Спустя два часа после начала эксперимента все значения относительной массы облака мутности укладываются в диапазон $M_{отн}(t = 120 \text{ мин}) = 0,10 \pm 0,05$. Это значение можно использовать при оценке времени существования облаков мутности, определяемого из условия $M_S(t = T_S) = (0,10 \pm 0,05) M_S(t = 0)$.

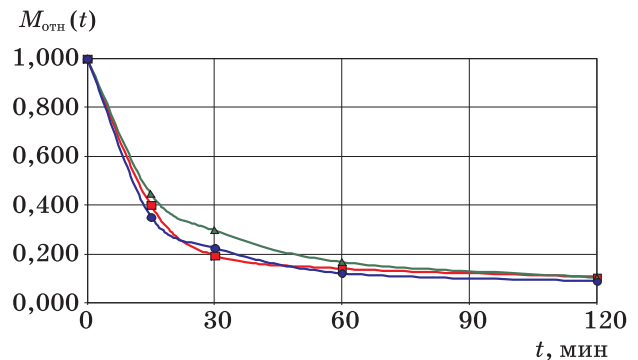
Следовательно, в соответствии с результатами экспериментов время существования облаков мутности при проведении отсыпок гравийных опор применительно к условиям строительства российской секции морского газопровода



а



б



в

Рис. 2. Изменение со временем после сброса гравия относительной массы донных отложений, перешедших во взвешенное состояние, $M_{отн}(t) = M_S(H_0, M_{гр}, t) / M_S(H_0, M_{гр}, t = 0)$ при всех условиях экспериментов: $M_{гр} = 1000$ г (а); 2000 г (б) и 4000 г (в) (H_0 : ■ - 0,6 м; ▲ - 1,2 м; ● - 1,8 м)

«Северный поток» будет измеряться первыми часами. Это существенно меньше времени, полученного по данным математического моделирования, в соответствии с которым время существования шлейфов с концентрацией, превышающей заданные концентрации в $10...50$ мг/л, составляет более 16 ч [4, табл. 4.3–3].

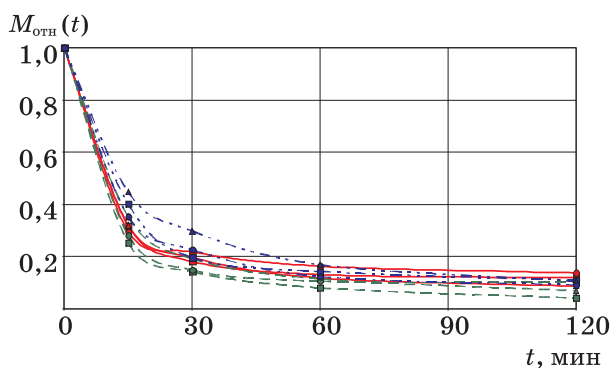


Рис. 3. Обобщенный график изменения со временем после сброса гравия относительной массы донных отложений, перешедших во взвешенное состояние, $M_{отн}(t) = M_s(H_0, M_{гр}, t) / M_s(H_0, M_{гр}, t = 0)$, при всех условиях экспериментов: (H_0 : ■ — 0,6 м; ▲ — 1,2 м; ● — 1,8 м) $M_{гр} = 1000$ г (линия); 2000 г (тире-тире) и 4000 г (точка-тире)

Выводы

Результаты экспериментов в масштабе природы показали, что реальное воздействие на окружающую морскую среду отсыпок гравийной смеси при строительстве газопровода «Северный поток», оцениваемое как по высоте поднятия над дном облаков наносов, перешедших во взвешенное состояние с поверхности дна, так и по времени существования этих облаков, будет существенно меньше того, которое было получено в результате математического моделирования данного процесса. Это воздействие в соответствии с фоновыми значениями концентраций не является критичным [5].

1. Гришин Н. Н. Транспорт наносов как фактор, определяющий возможность трансграничного воздействия на водную среду при прокладке морских газопроводов / Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей: Труды VII конференции. — М.: Российский университет дружбы народов, 2009. — С. 306–311.

2. Экспериментальное исследование воздействия на водную среду отсыпок гравийных опор при строительстве морских газопроводов / Н. Н. Гришин [и др.] // Гидротехническое строительство. — 2011 (в печати).

3. Документация по оценке воздействия на окружающую среду, разработанная

Nord Stream для проведения консультаций в рамках Конвенции Эспо Nord Stream AG. — 2009. — URL: <http://www.nord-stream.com/ru/eia-permitting/international-consultation-process/nord-stream-espoo-report.html>.

4. Проект строительства морского газопровода Nord Stream (российский сектор). — Т. 8. Охрана окружающей среды. — Кн. 1. Морской участок. — Ч. 1. Оценка воздействия на окружающую среду. — 2008. — URL: www.nord-stream.com/ru/eia-permitting/national-permitting-processes/nationalpage.html.

5. Offshore pipeline through the Baltic Sea / Spreading of sediment and contaminants during works in the seabed. Memo 4.3A-5. — Nord Stream. — Ramboll. — November, 2007.

6. Дополнение №2 к Перечню рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций и ориентировочно-безопасных уровней воздействия вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение; утв. приказом Госкомрыболовства России N 96 от 28 апреля 1999 года (Приложение к Правилам охраны поверхностных вод 1991 года). — Госкомрыболовство России. — М.: Минприроды России, 2001.

Материал поступил в редакцию 13.05.10.

Гришин Николай Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики

Тел. 8 (499) 135-72-01

E-mail: nikolay.grishin@nord-stream.com

Грицук Илья Игоревич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики

Тел. 8 (499) 135-72-01

E-mail: grizli@yauza.ru

Дебольский Владимир Кириллович, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией динамики русловых потоков и ледотермики

Тел. 8 (499) 135-72-01

E-mail: vdebolsky@mail.ru

Пономарёв Николай Константинович, кандидат технических наук, декан инженерного факультета

Тел. 8 (495) 952-08-29

E-mail: nponomarev@enigr.pfu.edu.ru