

На правах рукописи

БЕЛЯЕВ
Борис Владимирович

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ
ОПОРНЫХ БЛОКОВ СООРУЖЕНИЙ
НА ШЕЛЬФЕ С УЧЕТОМ
ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Специальность 05.23.07 – Гидротехническое строительство

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2004

Работа выполнена в ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева»

Научный руководитель:

Кандидат технических наук,
старший научный сотрудник *Е.Н. Беллендир*

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор *Н.Н. Загрядская*

Кандидат технических наук,
старший научный сотрудник *С.М. Мищенко*

Ведущая организация – ФГУП ЦКБ МТ «Рубин»

Защита состоится « ____ » _____ 2004 г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 212.229.15
в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет»
(195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
Гидрокорпус, ауд. 411)

С диссертацией можно ознакомиться
в Фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «СПбГПУ»

Автореферат разослан « ____ » _____ 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
докт. техн. наук, профессор

А.Е. Андреев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время площадь российского шельфа достигает 6,2 млн. км², что составляет около 21% шельфовой зоны всего мирового океана. Россия ежегодно извлекает свыше 380 млн. тонн нефти и 580 млн. м³ газа, но данный объем добычи может быть существенно увеличен за счет ввода в строй новых морских месторождений. По некоторым оценкам, извлекаемые запасы на российском шельфе достигают 100 млрд. тонн условного топлива (15,5 млрд. тонн нефти и 84,5 трлн. м³ газа), что составляет почти 20% мировых нефтегазовых запасов. Около 70% всех морских месторождений России расположено в сравнительно мелководной зоне (на глубинах до 200 м), и это делает российский шельф инвестиционно привлекательным для крупных нефтяных компаний.

Инженерное обеспечение различных этапов обустройства и освоения морских нефтегазовых месторождений сопровождается строительством стационарных погружных платформ. Основная часть перспективных для добычи нефти и газа шельфовых зон находится в замерзающих морях с тяжелыми ледовыми и волновыми режимами, суровыми природно-климатическими условиями и слабо развитой береговой инфраструктурой (арктические и дальневосточные моря России).

В связи с этим большое значение приобретает разработка эффективных конструкций опорных оснований морских шельфовых сооружений, подверженных волновым и ледовым воздействиям. Необходимы дальнейшее совершенствование существующих методов расчета, экспериментальная проверка проектных предложений, конструкторские проработки. Среди важнейших расчетных методов находятся методы расчета волновых воздействий на преграды с различными очертаниями поперечных сечений. Известно, что именно волны зачастую определяют конструкцию и основные размеры погружных платформ.

В действующих российских нормативных документах содержится недостаточно нормативных требований, учитывающих специфику стационарных нефтегазодобывающих платформ на континентальном шельфе. До настоящего времени отсутствует специальные СНиП на проектирование сооружений такого типа, а действующие СНиП содержат лишь общие указания по классификации стационарных платформ и некоторые требования к исходным данным и методам расчетов.

Вопросам определения волновых нагрузок и воздействий, а также расчетов прочности и устойчивости опорных оснований погружных платформ, посвящено достаточно большое число работ. В последнее десяти-

тилетие, в связи с началом промышленного освоения месторождений нефти и газа на шельфе Баренцева и Охотского морей, решение этой задачи приобрело особенно интенсивный характер. Большой вклад в исследование этих вопросов внесен трудами отечественных ученых: Ю.З. Алешкова, А.И. Альхименко, Б.В. Балашова, А.С. Большева, М.В. Бухтояровой, В.Б. Глаговского, А.Л. Гольдина, Н.Н. Загрядской, П.П. Кульмача, Д.Д. Лаппо, Д.А. Мирзоева, С.М. Мищенко, Е.Б. Михаленко, И.С. Нуднера, С.И. Рогачко, Ю.Г. Смирнова, С.И. Шибакина, К.Н.Шхинека, И.Ш. Халфина и др. Из зарубежных ученых следует отметить Ау, Босса, Бреббиа, Бреузерса, Гаррисона, Диина, Исааксона, Кастро, Крибеля, МакКами, Ронолда, Самера, Соулсби, Тейлора, Фачса, Фентона, Чакрабартти, Ханстена и др.

Цели и задачи работы. Основной целью работы является разработка практических методов расчета и конструирования опорных блоков сооружений на арктическом и дальневосточном шельфе с учетом волновых воздействий для повышения надежности и эффективности эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов.

В соответствии с поставленной целью решены следующие задачи: исследование волновых воздействий на сплошные преграды с большими поперечными размерами; составление схем нарушения устойчивости опорных блоков погружных платформ; учет динамического характера приложения внешних природных нагрузок (на примере волновых); определение порового давления и прочностных характеристик грунтов основания; разработка конструктивных предложений для защиты от местных размывов дна у опорных оснований ледостойких платформ.

Научная новизна работы состоит в комплексном подходе к изучению факторов, влияющих на устойчивость и прочность опорных блоков ледостойких платформ:

решена задача о характеристиках волн на поверхности жидкости постоянной глубины перед сплошными преградами с большими поперечными размерами с учетом нелинейного взаимодействия между исходными и отраженными волнами на уровне 3-го приближения;

определены возвышения волновой поверхности, волновые давления и волновые скорости;

получены характеристики расчетного шторма для учета цикличности нагружения;

разработаны конструктивные предложения для защиты от местных размывов дна у опорных оснований.

Практическая ценность результатов диссертационных исследований заключается в научном обосновании инженерных методов конструирования опорных блоков погружных платформ с учетом волновых воздействий.

В результате исследований разработаны программы для ЭВМ, позволяющие вычислять точечные давления на напорные поверхности платформ, удельные (линейные) нагрузки на единицу длины или ширины преград, равнодействующие сил на все сооружение или его части, суммарные опрокидывающие моменты, высоты подъема (опускания) уровня воды перед сооружением, а также характеристики расчетных штормов, волновые скорости и глубины размывов дна у опорных блоков.

Практическая значимость подтверждается использованием разработок автора при составлении: Специальных Технических Условий (СТУ) на проектирование морской погружной платформы для обустройства Приразломного нефтяного месторождения; Технических Условий (ТУ) на проектирование железобетонных опорных оснований для морских установок (платформы ПА-Б и ЛУН-А) по проекту Сахалин-2.

Реализация результатов исследования проведена:

организациями-заказчиками при разработке ТЭО (проектов) строительства погружных платформ для Приразломного, Пильтун-Астохского, Лунского, Обского, Каменномысского и других месторождений;

проектными организациями на этапах разработки специальных технических условий и ТЭО (проектов) вышеуказанных погружных платформ.

Личный вклад автора состоит в осуществлении комплексного подхода к изучению факторов, влияющих на устойчивость и прочность опорных блоков ледостойких платформ, постановке задачи о характеристиках волнения на поверхности жидкости у сплошных преград реального очертания, получении результатов и их анализе.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на следующих конференциях и семинарах:

VI Международной конференции «Освоение шельфа арктических морей России» (РАО-03)(г. Санкт-Петербург, 2003 г.);

XX Международной конференции «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов» (BEM@FEM-03) (г. Санкт-Петербург, 2003 г.);

Международной научно-практической конференции «Безопасность водного транспорта» (г. Санкт-Петербург, 2003 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 170 наименований. Работа содержит 159 страниц машинописного текста и 46 иллюстраций.

На защиту выносятся:

1. Методика расчета основных характеристик волнения перед сплошными преградами с большими поперечными размерами на уровне 3-го приближения.

2. Рекомендации по расчету волновых нагрузок и воздействий на погружную платформу «Приразломная».

3. Методика определения характеристик расчетного шторма для учета цикличности нагружения, а также местных размывов при совместном действии волн и течений.

4. Инженерные рекомендации по выбору габаритных размеров опорных оснований погружных платформ, в том числе с учетом цикличности нагружения.

5. Конструктивные предложения по защите дна у опорного основания погружной платформы «Приразломная» от местных размывов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, ее научная новизна и практическая ценность, формулируется цель и задачи исследований.

Первая глава посвящена обзору состояния вопроса и основных предпосылок исследований. Приведена классификация и даны примеры конструкций сооружений для освоения арктического и дальневосточного шельфа. Указано, что в связи со значительным собственным весом погружных платформ предъявляются повышенные требования к прочности и устойчивости грунтов дна. Как правило, требуется выравнивание поверхности морского дна, удаление верхнего слоя слабых грунтов и защита оснований от размыва. Иногда может потребоваться укрепление грунтов дна. Не исключено чрезмерное засасывание фундаментного блока в мягкие грунты дна при циклических нагрузках (разжижение грунта), а также вымывание грунта из-под подошвы блока волнами и течением.

Отмечено, что в действующих российских нормативных документах содержится недостаточно нормативных требований, учитывающих специфику стационарных нефтегазодобывающих платформ на континентальном арктическом и дальневосточном шельфе. До настоящего времени отсутствуют специальные СНиП на проектирование сооружений такого типа, а

действующие СНиП содержат лишь общие указания по классификации стационарных платформ и некоторые требования к исходным данным и методам расчетов. Для различных ведомственных нормативов характерны методически отличающиеся подходы и даже определенные расхождения (особенно этим отличаются российские и зарубежные нормы).

Указано, что вопросам определения волновых нагрузок и воздействий на опорные основания погружных платформ посвящено достаточно большое число работ. В преобладающей их части исследовались нагрузки и воздействия волн на вертикальные круглоцилиндрические преграды с большими поперечными размерами, пересекающие поверхность воды в покое. Полученные в них результаты в практике проектирования опорных блоков погружных платформ могут быть использованы только частично, так как их поперечные сечения имеют, как правило, достаточно сложные, близкие к прямоугольным, очертания.

Показано, что в настоящее время существует достаточно обобщенный метод определения нагрузок от волн на вертикальные протяженные стенки, ширина которых превышает длину расчетных волн. Обобщенные рекомендации по этому вопросу представлены в действующих в нашей стране нормах. За рубежом широкое распространение получил полуаналитический метод Года. Однако эти рекомендации распространяются в основном только на прямой подход волн к стенкам, и при этом в них не учитываются эффекты обтекания. Между тем, методы учета нелинейных компонентов волновых нагрузок на сооружения вертикального профиля могут быть применены и для случая сплошных отдельно стоящих преград.

Отмечено, что в практике проектирования шельфовых сооружений для определения волновых нагрузок и воздействий широко применяются разнообразные программные комплексы (WAMIT, MOSES, «Anchored Structures» и др.). Для них характерны представления о синусоидальном профиле волны и малости высоты волны по сравнению с глубиной воды. Такой линейный подход недостаточен для условий, характерных для большинства мелководных районов арктического и дальневосточного шельфа.

Сделан вывод о необходимости разработки новых методов расчета волновых нагрузок и воздействий, обусловленной уникальностью проектов сооружений арктического и дальневосточного шельфа, сложностью климатических условий в районе их предполагаемого строительства и частичной недостаточностью действующих нормативных документов и применяемых программных продуктов.

Во второй главе поставлена и решена задача о взаимодействии свободных бегущих волн на поверхности жидкости постоянной глубины со сплошными отдельно стоящими преградами в виде вертикального восьмиугольного параллелепипеда с учетом нелинейных поправок до уровня третьего приближения включительно. Задача применительно к рис. 1 формулируется следующим образом.

Свободные бегущие волны высотой h и длиной λ , перемещаясь по водоему с постоянной глубиной d , встречают на своем пути отдельно стоящую преграду в виде вертикального восьмиугольного параллелепипеда с гранями A, B, C, D, E, F, G и H , при этом грани D и H направлены вдоль оси Ox , а грани B и F – вдоль оси Oy . Жидкость идеальная, с постоянной плотностью ρ ; движение безвихревое, установившееся. Требуется определить выражения для характеристик волн у преграды с учетом эффектов интерференции у лобовых граней и дифракции – у тыловых граней.

Принято, что идеальная несжимаемая жидкость в состоянии покоя заполняет бассейн с размерами: $-\infty < x < \infty$, $-\infty < y < \infty$, $0 \leq z \leq d$. Как известно, функция потенциала скорости $\varphi(x, y, z, t)$ волнового движения должна удовлетворять уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

при соблюдении следующих граничных условий: кинематического на дне $z = d$ (непроницаемость дна бассейна для жидкости)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

кинематического на свободной волновой поверхности $z = \eta(x, y, t)$ (непрерывность смещений поверхности)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0; \quad (3)$$

динамического на свободной волновой поверхности $z = \eta(x, y, t)$ (непрерывность давлений на поверхности)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] - g\eta = 0. \quad (4)$$

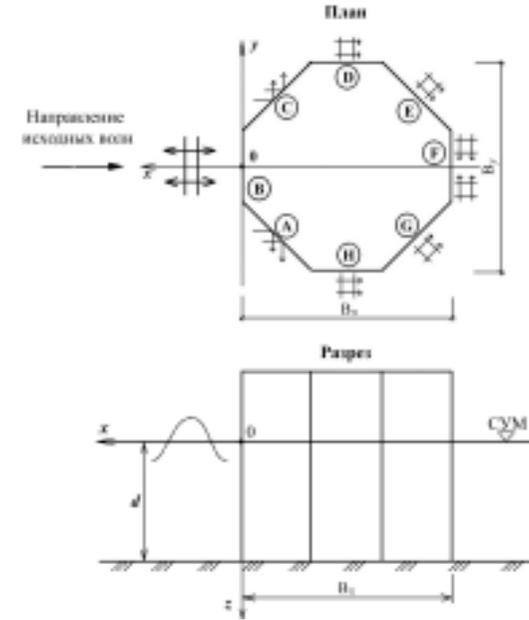


Рис. 1. Расчетная схема

Для лобовой грани B функции потенциала итогового волнового движения φ_{db} , возвышений волновой поверхности η_{db} и волновых давлений p_{db} получены в следующем виде

$$\varphi_{db} = \varphi_{cb} + \varphi_{rb} + \varphi_{crb}, \quad (5)$$

$$\eta_{db} = \eta_{cb} + \eta_{rb} + \eta_{crb}, \quad (6)$$

$$p_{db} = p_{cb} + p_{rb} + p_{crb}. \quad (7)$$

где φ_{cb} , η_{cb} и p_{cb} – функции потенциала, возвышений волновой поверхности и волновых давлений в исходных набегающих на грань B волнах; φ_{rb} , η_{rb} и p_{rb} – функции потенциала, возвышений волновой поверхности и волновых давлений в отраженных от грани B волнах; φ_{crb} , η_{crb} и p_{crb} – функции потенциала, возвышений волновой поверхности и волновых давлений в волнах, образующихся от нелинейного взаимодействия исходных и отраженных от грани B волн. В главе приводятся формулы для всех функций в выражениях (5...7).

Аналогичные формулы получены для потенциалов, возвышений волновой поверхности и волновых давлений в волнах, образующихся у всех других граней отдельно стоящей преграды больших поперечных размеров в виде вертикального восьмиугольного параллелепипеда. При этом выполняются законы сохранения, в том числе законы сохранения энергии и импульса.

Данные формулы могут быть использованы при определении возвышений свободной (волновой) поверхности у граней преграды, волновых (гидродинамических) давлений и суммарных волновых сил и моментов, а также скоростей движения частиц жидкости в волнах у сплошных отдельно стоящих преград.

Отмечено, что расчёты по полученным выражениям следует проводить с применением специально разработанных программ для ПЭВМ в рамках приложения «Microsoft Excel» на языке «Visual Basic for Applications». Эти программы применены в дальнейшем при исследовании взаимодействия волн с различными преградами практического очертания.

В третьей главе приведены примеры практических расчетов воздействий волн на преграды, иллюстрирующие применение теоретических положений предыдущей главы. Исследованы волновые воздействия на восьмиугольный вертикальный равносторонний параллелепипед с поперечным сечением, близким по очертаниям к кругу, а также на восьмиугольный вертикальный параллелепипед с прежними габаритами, но со значительно меньшими длинами граней A , C , E и G (поперечное сечение преграды близко по очертаниям к квадрату).

Сравнение результатов для случаев близкого к кругу и близкого к квадрату поперечных сечений восьмиугольных вертикальных параллелепипедов показывает, что при близком к кругу сечении имеет место уменьшение суммарного волнового давления. В процентном отношении уменьшение сдвигающей силы и опрокидывающего момента составляет 5...14%.

Выполнен сопоставительный анализ расчетных и экспериментальных данных, при этом основное внимание уделено силовым воздействиям волн на стационарные сооружения с опорными элементами в виде вертикальных цилиндров и призм. Расчетные значения волновых воздействий определялись путем вычислений на ПЭВМ по специально составленным программам. Сравнение расчетных и экспериментальных данных проводилось при условии соизмеримости поперечных размеров (диаметров) преград с длиной волны.

Кривые равных значений относительных возвышений $\xi_{\max} = \eta_{c,\max} / \eta_{c,i}$, где $\eta_{c,i}$ – возвышения свободной волновой поверхности в от-

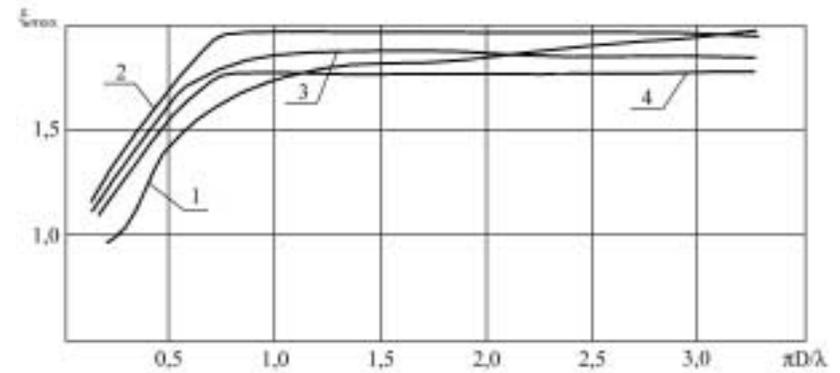


Рис. 2. Относительные возвышения волновой поверхности у контура вертикальной круглоцилиндрической преграды:
1 – по нормам ВСН 41.88; 2, 3, 4 – по формулам автора при $h/\lambda = 0,05; 0,10$ и $0,15$

сутствие преград, показаны на рис. 2. Кривые равных значений ξ_{\max} , найденные по формулам автора, и построенные по нормам ВСН 41.88, достаточно близки друг к другу. Подтверждается, что известный вывод ряда авторов о необходимости учета поправок второго и третьего приближений при определении экстремальных значений ординат свободной волновой поверхности является справедливым и для цилиндрических преград.

Построены графики значений инерционных коэффициентов в зависимости от дифракционного параметра $\pi D/\lambda$, используемых для определения горизонтальной (сдвигающей) составляющей волновых нагрузок на цилиндрические преграды с диаметром D .

На рис. 3 представлены результаты сопоставления расчетных данных, полученных по формулам автора, с данными, приведенными в пояснительной записке к разработанным в войсковой части 13073 дополнениям к СНиП 2.06.04-82*. Как видно, при больших дифракционных параметрах ($\pi D/\lambda > 1,1$) расчетные значения C_p , найденные с учетом нелинейных эффектов, оказываются несколько больше значений, полученных по линейной теории дифракции.

В целом, проведенные анализ и сравнение расчетных и опытных данных о волновых нагрузках показывают достаточную корректность полученного в предыдущей главе решения.

Предложены следующие рекомендации по расчету волновых нагрузок и воздействий на платформу «Приразломная», включенные в специальные технические условия (СТУ).

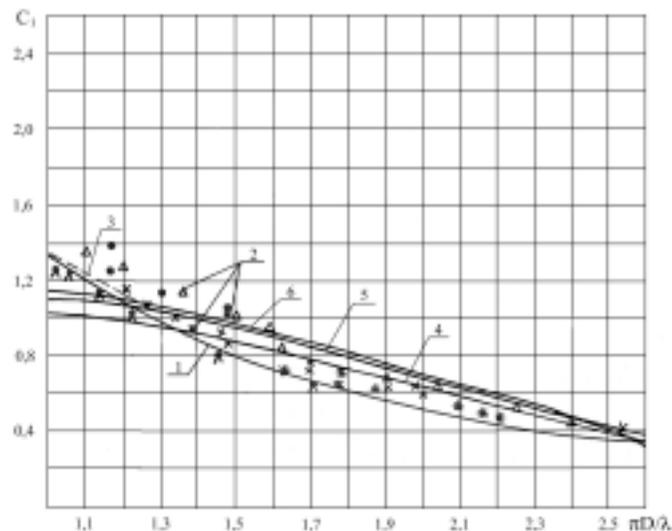


Рис. 3. Инерционные коэффициенты C_i для вертикального цилиндра:

1 – по линейной теории; 2 – точки по опытам; 3 – график $2k_v$ из СНиП 2.06.04-82*; 4, 5, 6 – по формулам автора при $d/\lambda = 0,46; 0,27$ и $0,15$

Волновые нагрузки на опорное основание платформы следует определять для случаев нормального подхода луча волны (под углом $\alpha = 90^\circ$ к лобовой грани).

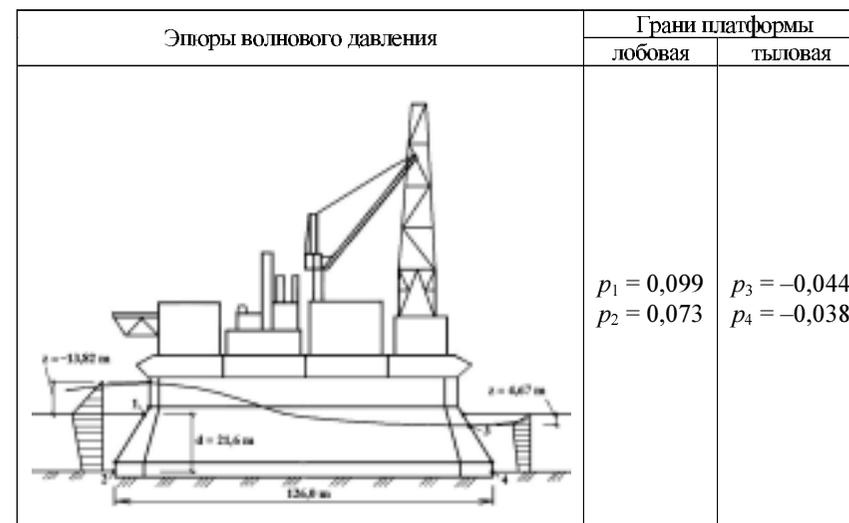
Нормативные значения волнового давления p в центральных точках лобовой и тыловой грани платформы необходимо определять следующим приближенным методом.

По приведенным в табл. 1 значениям давлений (МПа) для вертикальной стенки, полученным с использованием зависимостей главы 2, строятся эпюры волнового давления на напорные поверхности платформы «Приразломная» в предположении, что давления равны таковым для вертикальной стенки и направлены нормально к граням. Изменение давления принимается по линейному закону:

для вершины волны – между свободной волновой поверхностью и расчетным уровнем, а также между расчетным уровнем и дном;

для подошвы волны – между расчетным уровнем и свободной волновой поверхностью, а также между свободной волновой поверхностью и дном.

Высота подъема или опускания уровня воды у напорных граней при вершине и подошве волны принимается равной таковой для вертикальной стенки.



Распределение волновых давлений по фронту волны вдоль лобовой и тыловой грани платформы следует условно принимать в соответствии со схемами по типу рис. 4, 5.

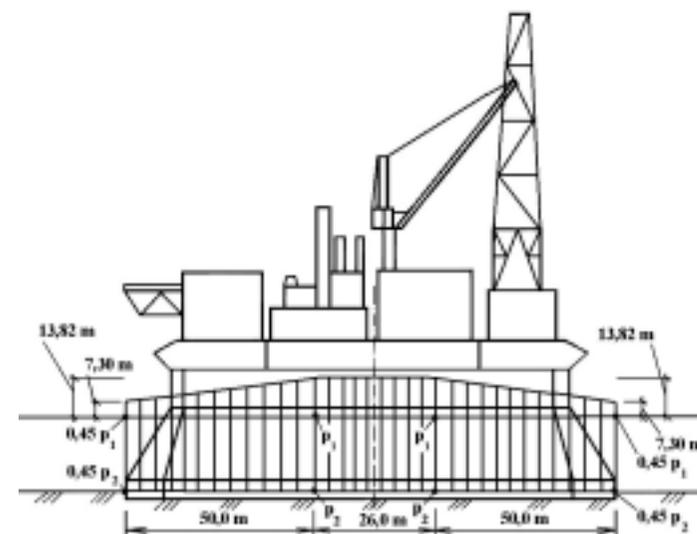


Рис. 4. Распределение волновых давлений по фронту волны вдоль лобовой грани платформы при гребне волны у лобовой грани

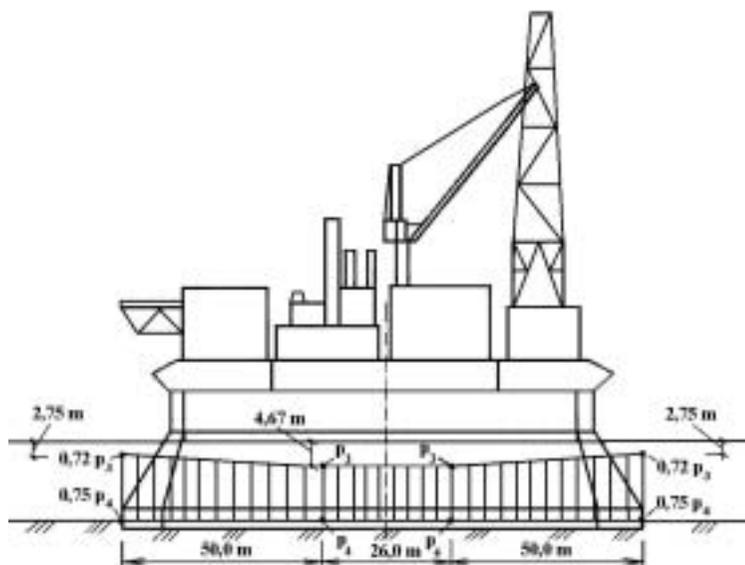


Рис. 5. Распределение волновых давлений по фронту волны вдоль тыловой грани платформы при гребне волны у лобовой грани

В четвертой главе приведены рекомендации по выбору основных габаритных размеров опорных оснований погружных платформ. Отмечено, что в общем случае должны выполняться расчеты:

устойчивости грунтовых оснований сооружений при различных сочетаниях нагрузок;

вертикальных и горизонтальных перемещений и кренов опорных блоков;

контактных напряжений, передаваемых от грунта основания на конструктивные элементы опорных блоков (например, подошвы, юбки и т.п.) и др.

Под устойчивостью грунтовых оснований шельфовых сооружений в общем случае понимается отсутствие областей существенных смещений с появлением зон выпора грунта из-под сооружений, сопровождаемых полным или частичным нарушением его структуры, разрывами сплошности, образованием трещин и др. Основной причиной появления таких областей является превышение внешними нагрузками предельной несущей способности грунтов основания.

В соответствии с российскими нормами расчеты устойчивости грунтовых оснований должны производиться по методу предельных состояний.

Грунтовые основания при этом рассчитываются, исходя из следующего условия устойчивости:

$$F_d \leq R_d, \quad (8)$$

где $F_d = (\gamma_n \gamma_{lc} / \gamma_c) \sum \gamma_f F_k$ – обобщенное расчетное силовое воздействие; γ_n – коэффициент надежности по ответственности (назначению) сооружения, учитывающий класс его капитальности, а также значимость последствий при наступлении тех или иных предельных состояний; γ_{lc} – коэффициент сочетаний нагрузок; γ_c – коэффициент условий работы, учитывающий тип сооружения, конструкции или основания, вид материала, приближенность расчетных схем, вид предельного состояния и др.; F_k – нормативная нагрузка; γ_f – коэффициент надежности по нагрузке; R_d – обобщенная несущая способность.

Несущая способность грунтового основания R_d при наличии юбок на нижней поверхности опорного блока должна определяться для следующих основных схем нарушения устойчивости:

схема 1 – плоский сдвиг по плоскости контакта опорного блока с морским дном в сочетании с образованием клинообразных зон разрушения около юбок (рис. 6);

схема 2 – глубинный сдвиг по слабым глинистым прослоям ниже юбок с образованием односторонних выпоров грунта (рис. 7).

При расчетах по *схеме 1* (плоский сдвиг без поворота – рис. 6) характеристики F_d и R_d в формуле (8) следует определять по зависимостям:

$$F_d = F_h + E_a + E_{ab}, \quad (9)$$

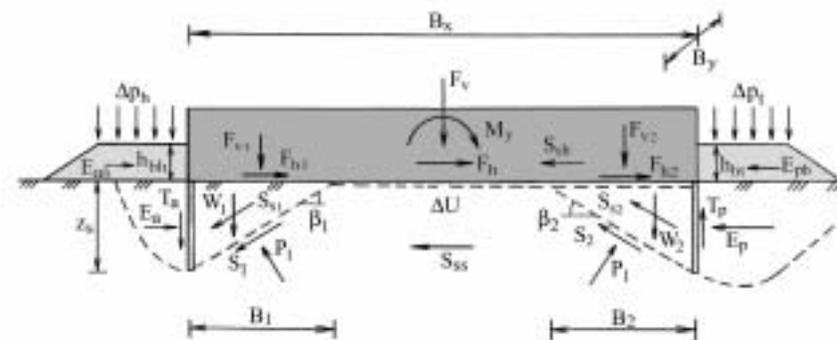


Рис. 6. Расчетная схема при плоском сдвиге без поворота

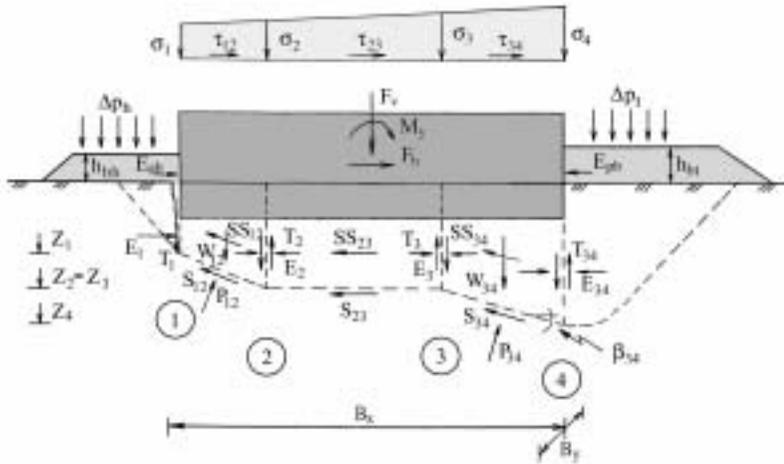


Рис. 7. Расчетная схема при глубинном сдвиге с выпором грунта основания

$$R_d = F_v \operatorname{tg} \phi_1 + E_p + E_{pb} + A_g c_1 \quad (10)$$

где F_h – сумма горизонтальных составляющих расчетных значений активных сил, действующих в направлении сдвига, за исключением активного давления грунта (например, в летний период сумма нагрузок от волн, течений и ветра – $F_h = F_{h,wave} + F_{h,current} + F_{h,wind}$); F_v – сумма вертикальных составляющих расчетных нагрузок на уровне поверхности сдвига (например, в летний период сумма нагрузок от собственного веса и волн – $F_v = F_{v,weight} + F_{v,wave}$); $E_{a(b)}$ и $E_{p(b)}$ – расчетные значения горизонтальных составляющих сил активного давления грунта (защитной наброски), действующих в направлении сдвига, и сил пассивного давления, действующих в противоположном направлении; A_g – площадь подошвы опорного блока, в пределах которой отсутствуют растягивающие напряжения и учитывается сцепление; при отсутствии зоны растяжения $A_g = A$, где A – площадь подошвы опорного блока; $\operatorname{tg} \phi_1$, c_1 – расчетные значения характеристик грунта на уровне поверхности сдвига.

При расчетах по схеме 2 (глубинный сдвиг с выпором грунта основания – рис. 8) несущую способность R_d в формуле (8) следует определять на основе зависимостей теории предельного состояния. Здесь допускается расчленение сдвигаемого массива грунта на отсеки и исследование их равновесия с учетом напряжений на контакте грунта с подошвой опорного блока и между отсеками. В расчетах по схеме глубинного сдвига, как правило, осуществляется перебор большого количества потенциальных поверхностей сдвига, что требует использования специализированных компьютерных программ.

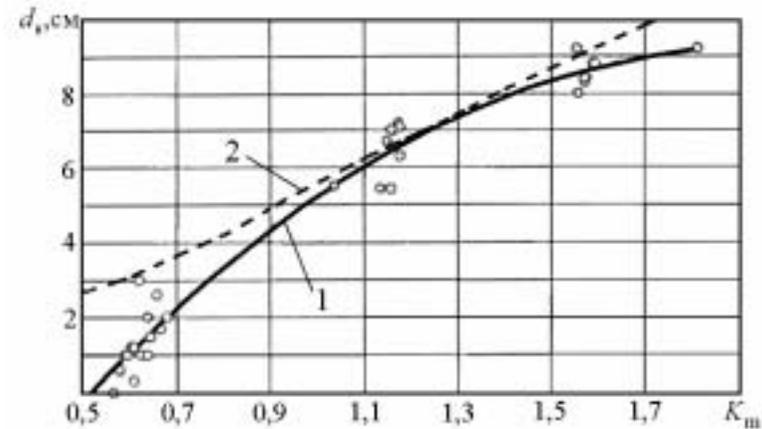


Рис. 8. Графики изменения глубины размыва в зависимости от коэффициента подвижности наносов:
1 – осредняющая кривая по данным опытов С.М. Мищенко;
2 – по расчетам автора

Сформулированы основные положения методики учета цикличности нагружения, приводящей к росту порового давления в жидкости и снижению прочностных характеристик грунта. Суть ее заключается в определении количества циклов нагружения N , необходимых для разрушения образца песка при различных соотношениях статической τ_a и динамической τ_{cy} составляющих циклической прочности.

В соответствии с данной методикой испытания образцов песчаного грунта должны проводиться как на установках трехосного сжатия, так и на установках прямого сдвига. Предварительно определяется прочность недеривированному сдвигу S_u грунта и параметры трения в условиях квазистатического нагружения. Далее при различных комбинациях статической τ_a и циклической τ_{cy} составляющих напряжений экспериментальным путем находится количество N циклов нагружения, приводящее к разрушению образца при постоянном объеме.

На основе результатов испытаний для всех наиболее возможных потенциальных поверхностей сдвига f строятся диаграммы предельной динамической прочности $\tau_{f,cy} = (\tau_a + \tau_{cy})_f$ в зависимости от отношения приращения порового давления ΔU к количеству N циклов нагрузок, нормированных на среднее эффективное напряжение σ'_c . Далее с помощью диаграмм определяются константы A и B в формуле

$$\beta = 10^{[A(\tau_{f,cy}/\sigma'_c) - B]} \quad (11)$$

по которой в дальнейшем определяются значения приращений порового давления ΔU в зависимости от предельной динамической прочности $\tau_{f,cy}$ и количества N циклов волновых нагрузок.

Несущая способность грунтового основания R_d окончательно находится по формуле

$$R_d = \frac{\text{tg } \varphi_n}{\gamma_g} \left[\sigma_c \left(1 - \frac{\Delta U}{\sigma_c} \right) \right] A_b, \quad (12)$$

где $\text{tg } \varphi_n$ – нормативная характеристика трения грунта, γ_g – коэффициент надежности по грунту, A_b – площадь основания сооружения, а остальные обозначения прежние.

Далее рассмотрена задача по определению характеристик расчетного шторма для учета цикличности нагружения на основе модели Слепяна. Высота значительных волн $h_s(t)$ в шторме считается стационарной случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения (закону Гаусса). В результате строится профиль шторма, по которому определяются продолжительность T_D шторма и максимальное значение высоты $h_{s,max}$ значительной волны.

Апробация предложенного решения была проведена путем сопоставления результатов с данными наблюдений за характеристиками штормов в юго-восточной части Баренцева моря. Было выполнено распределение волн по группам в расчетном шторме для района Приразломного месторождения, использованное при определении порового давления и прочностных характеристик грунтов основания платформы «Приразломная».

Сформулированы основные положения расчетов местных размывов грунтовых оснований у погружных платформ. Предложено использовать следующую совокупность специальных приемов.

Во-первых, на физической модели в лабораторных условиях должны выявляться места расположения наиболее интенсивных местных размывов дна с учетом совместного действия волн и течений. Исследования должны проводиться на основе методов теорий подобия и размерностей.

Во-вторых, в выявленных наиболее опасных с точки зрения размывов местах с помощью теоретических зависимостей второй главы данной диссертации должны определяться наибольшие донные волновые скорости.

В-третьих, по предлагаемым инженерным формулам должны вычисляться глубины местных размывов (с учетом известных элементов волн и течений, характеристик грунтовых условий и параметров литодинамических процессов, заданных размеров опорного основания, конструкции

защиты дна от размыва и др.), и далее сопоставляться с допускаемыми (например, с принятой в проекте высотой юбки).

На рис. 8 представлены результаты сравнения наибольших глубин размыва d_s в зависимости от коэффициента подвижности наносов K_m , полученных в ходе модельных испытаний С.М. Мищенко, с расчетными данными автора.

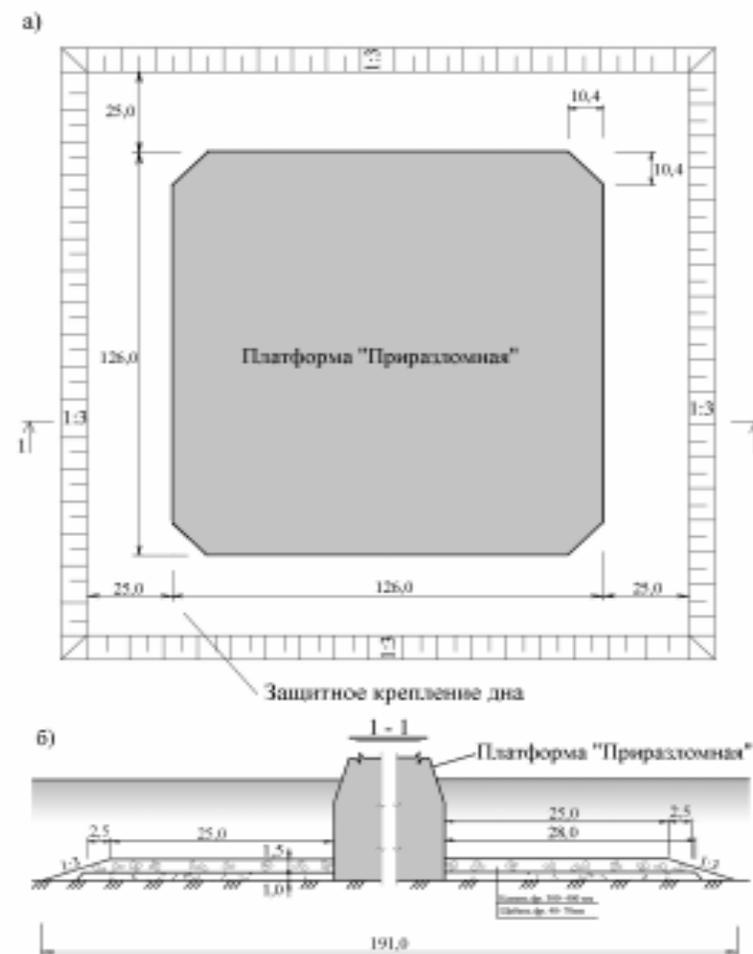


Рис. 9. План (а) и разрез (б) защитного крепления дна у опорного блока платформы «Приразломная» по предложению автора

Выполнен анализ и предложены рекомендации по конструированию защиты дна от местных размывов у платформы «Приразломная». С учетом экспериментальных данных автором предложена следующая конструкция защитного крепления дна (рис. 9): подстилающий слой (обратный фильтр) из щебня крупностью 40...70 мм; основной слой из сортированного камня крупностью 300...400 мм. Ширина отсыпки по гребню составит 25 м, толщина отсыпки – 2,5 м; толщина обратного фильтра – 1,0 м; толщина основного слоя – 1,5 м; заложение откосов наброски – 1:3.

Для устройства такого крепления дна потребуется сортированного камня крупностью 300...400 мм – 31.300 м³ (около 62.500 т) и щебня крупностью 40...70 мм – 17.750 м³ (около 30.150 т). Предлагаемая конструкция позволит отказаться от использования оборудования для устранения сегрегации (разделения грунта на фракции при отсыпке) и значительно сократить время на отсыпку грунта, а также избежать операций тщательного выравнивания подстилающего слоя и в целом уменьшить толщину основного слоя защитной отсыпки до 1,0 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных автором теоретических и экспериментальных исследований осуществлен комплексный подход к изучению факторов, влияющих на устойчивость и прочность опорных блоков погружных платформ. Основные результаты состоят в следующем:

1. Получены аналитические выражения для возвышений волновой поверхности, волновых давлений и волновых скоростей перед сплошными преградами с большими поперечными размерами на уровне 3-го приближения.

2. Разработаны программы для персональных ЭВМ, написанные для «Microsoft Excel» на языке «Visual Basic for Applications», позволяющие вычислять точечные давления на напорные поверхности платформ, удельные (линейные) нагрузки на единицу длины или ширины преград, равнодействующие сил на все сооружение или его части, суммарные опрокидывающие моменты, высоты подъема (опускания) уровня воды перед сооружением, а также глубины местных размывов дна у опорных блоков.

3. Для обоснования достоверности полученных результатов выполнен сопоставительный анализ расчётных и имеющихся экспериментальных данных о волновых нагрузках и воздействиях на разнообразные преграды. Отмечено удовлетворительное соответствие теоретических, натуральных и лабораторных результатов.

4. Разработана инженерная методика конструирования опорных блоков сооружений на шельфе с учетом волновых воздействий.

5. Разработана методика получения характеристик расчетного шторма для учета цикличности нагружения.

6. Разработаны конструктивные предложения для защиты от местных размывов дна у опорных оснований ледостойких платформ.

7. Предложены инженерные рекомендации по конструированию опорного основания платформы «Приразломная», предназначенной для эксплуатации в суровых условиях Юго-Востока Баренцева моря.

8. Полученные результаты были использованы: организациями-заказчиками при разработке ТЭО (проектов) строительства погружных платформ для Пильтун-Астохского, Лунского, Приразломного, Обского, Каменномысского и других месторождений; проектными организациями на этапах разработки СТУ и ТЭО (проектов) вышеуказанных погружных платформ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. К теории взаимодействия поверхностных волн с опорными основаниями морских нефтегазопромысловых буровых установок // Деп. ФГУП ВНИИТПИ Госстроя РФ, № 11915, опубли. в Библ. указ. деп. рук., вып. 1, 2003.

2. Сопоставительный анализ воздействий поверхностных волн на отдельно стоящие преграды с большими поперечными размерами // Деп. ФГУП ВНИИТПИ Госстроя РФ, № 11916, опубли. в Библ. указ. деп. рук., вып. 1, 2003.

3. Учет цикличности нагружения грунтовых оснований платформ для обустройства нефтегазовых месторождений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2003. Т. 242, С.201-207 (соавторы Е.Н. Беллендир, М.Е. Миронов).

4. Местные размывы у платформ для обустройства нефтегазовых месторождений при совместном действии волн и течений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2003. Т. 242, С.208-214 (соавторы Е.Н. Беллендир, М.Е. Миронов).

5. Расчеты взаимодействия нелинейных волн с ледостойкими буровыми платформами // Материалы VI международной конференции "Безопасность водного транспорта", 2003 (соавторы Е.Н. Беллендир, М.Е. Миронов).

6. Нормирование природных нагрузок на морские гидротехнические сооружения водного транспорта // Материалы международной конференции "Освоение шельфа арктических морей России" (РАО-03). 2003. С. 183 (соавторы Е.Н. Беллендир, М.Е. Миронов).

7. Математическое моделирование взаимодействия поверхностных волн с ледостойкими буровыми платформами // Материалы XX Международной конференции "Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов" (ВЕМ@FEM-03), 2003 (соавтор М.Е. Миронов).