

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-62-72
УДК 629.563.2:629.5.015.4

Г.Б. Крыжевич
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОНОБЛОКОВ МЕЖДУ СОБОЙ И С СУДНОМ ПРИ МОНТАЖЕ БУРОВЫХ ПЛАТФОРМ НАПЛЫВНЫМ СПОСОБОМ В УСЛОВИЯХ ВОЛНЕНИЯ

Объект и цель научной работы. Объектом работы являются плавучие полупогружные буровые установки (ППБУ), монтаж которых осуществляется в морских условиях методом надвига на плавучесть. Целью работы является расчетная оценка усилий, возникающих при динамическом взаимодействии моноблоков между собой и с судном при монтаже буровых платформ, сопоставление их с усилиями, возникающими при морской перевозке моноблоков в условиях более интенсивного волнения, а также разработка метода приближенного расчета динамических сил, действующих на палубу судна и на колонны опорного основания ППБУ.

Материалы и методы. Оценка усилий при динамическом взаимодействии моноблоков между собой и с судном выполняется численными методами с использованием известного программного комплекса Anchored structures.

Основные результаты. При анализе численных расчетов динамического взаимодействия моноблоков (опорного основания (ОО) и верхнего строения (ВС)) в процессе сборки из них ППБУ «Полярная звезда» в условиях малого морского волнения, ветра и течения установлено, что усилия, передаваемые ВС на палубу судна и на колонны ОО, представляют собой нестационарные случайные процессы с большой изменчивостью, наблюдаемой только в начальной и в завершающей стадиях монтажной стыковочной операции, причем реализуемые при этом силовые воздействия на палубу сопоставимы с нагрузками, возникающими при перевозке ВС судном на интенсивном волнении. На основе результатов анализа предложен приближенный способ оценки максимальных динамических нагрузок на палубу судна и на колонны ОО в процессе морской сборки ППБУ.

Заключение. Показано, что при выполнении морского монтажа ППБУ в условиях малого волнения возможно сильно динамическое взаимодействие моноблоков между собой и с судном. Такое явление может привести к разрушениям и повреждению конструкций моноблоков и палубы судна при проведении морской операции, к ухудшению качества монтажа (появление высоких уровней остаточных напряжений и деформаций в конструкциях сооружения, снижающее их работоспособность и надежность при последующей эксплуатации) или его срыву. Для предотвращения негативных последствий этого явления необходимы тщательная проработка проекта морской монтажной операции с выполнением предлагаемых в работе расчетов усилий динамического взаимодействия объектов монтажа. На основе их результатов обоснованно назначаются ограничения (по погодным условиям) на проведение сборки ППБУ. Таким образом, предлагаемый расчетный способ динамических нагрузок является важным элементом подготовки высокотехнологичной морской операции монтажа нефтегазодобывающих платформ.

Ключевые слова: плавучие полупогружные буровые установки, монтаж морских платформ, динамика плавучих сооружений.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-62-72
UDC 629.563.2:629.5.015.4

G. Kryzhevich
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

DYNAMIC INTERACTION OF SEMI-SUBMERSIBLE DRILLING PLATFORM MODULES WITH EACH OTHER AND WITH THE SHIP DURING PLATFORM FLOAT-OVER IN WAVES

Object and purpose of research. This paper studies semisubmersible drilling platforms assembled at sea as per float-over technique. The purpose of the study is to analytically estimate the forces generated by dynamic interaction

Для цитирования: Крыжевич Г.Б. Динамическое взаимодействие моноблоков между собой и с судном при монтаже буровых платформ наплывным способом в условиях волнения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 62–72.

For citations: Kryzhevich G. Dynamic interaction of semi-submersible drilling platform modules with each other and with the ship during platform float-over in waves. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 62–72 (in Russian).

of modules with each other and with the ship in the process of platform assembling, as well as to compare these forces with the ones that arise during sea transportation of modules in more intense waves, and also to develop an approximate calculation method for dynamic forces acting on ship deck and substructure pillars of semisubmersible.

Materials and methods. The forces caused by dynamic interaction of modules with each other and with the ship are assessed numerically, by means of well-known *Anchored Structures* software package.

Main results. Analysis of numerical calculation data for dynamic interaction of substructure modules with the topsides of *Polyarnaya Zvezda* semisubmersible during its assembly in weak waves, wind and current has shown that the forces transferred from the topsides to ship deck and substructure pillars are unsteady and highly-variable random processes observed only at initial and final stages of assembling, and the forces arising here are commensurable with the loads suffered by the topsides during sea transportation in high seas. Analysis of the results is used to suggest an approximate assessment method for maximum dynamic loads on ship deck and substructure pillars during semisubmersible floater assembling at sea.

Conclusion. It is shown that semisubmersible floater assembling in weak waves might be accompanied by a strong dynamic interaction of its modules with each other and the ship, which could result in damage or destruction of modules and deck during sea operation, as well as create high residual stresses and strains in these structures worsening their further operability and reliability. All these factors can seriously or even unacceptably deteriorate the quality of assembling. These outcomes can only be prevented through careful planning of sea assembling operation, with calculation of dynamic interaction forces as suggested in this paper. The results of these calculations may serve to justify assignment of weather limitations for semisubmersible floater assembling. Thus, calculation method for dynamic loads suggested in this paper is an important element in preparing a high-tech marine operation: assembling of oil & gas production rigs.

Keywords: semisubmersible floaters, assembling of marine platforms, dynamics of floating structures.

Author declares lack of the possible conflicts of interests.

Введение

Introduction

Сборка ППБУ из двух моноблоков (из опорного основания (ОО) и верхнего строения (ВС)) с использованием саморазгружающихся (полупогружных) большегрузных транспортных судов (СБТС – рис. 1) часто практикуется при создании нефтегазодобывающих платформ [1, 2]. Примером успешного выполнения такой высокотехнологичной

морской операции является монтаж ВС на ОО методом надвига на плаву при строительстве ППБУ «Полярная звезда» и «Северное сияние». Принципиальная технология монтажа разработана Крыловским государственным научным центром [3] совместно с Выборгским судостроительным заводом, компанией Dockwise (Нидерланды) и судостроительной верфью Samsung (Ю. Корея).

Установка ВС на ОО относится к морским операциям с высокой степенью риска и поэтому



а)



б)

Рис. 1. Транспортировка моноблоков полупогружной буровой установки «Полярная Звезда» на саморазгружающемся большегрузном транспортном судне компании Dockwise: а) перевозка опорного основания на судне Talisman; б) перевозка верхнего строения на судне Black Marlin

Fig. 1. Transportation of *Polyarnaya Zvezda* modules aboard Dockwise self-unloading heavy-lifters: a) substructure carried by *Talisman*; b) topsides carried by *Black Marlin*

требует тщательной подготовки, включающей разработку специальных проектов морских технологических операций по установке ОО на точке монтажа и последующей стыковке ВС с ОО. Целями таких разработок являются:

- обеспечение выполнения стыковки и монтажа в короткие сроки и с высоким качеством;
- гарантирование отсутствия разрушений и повреждений конструкций при стыковке;
- обеспечение низких уровней остаточных напряжений и деформаций при стыковке и сборке, гарантирующих их малое влияние на работоспособность и надежность при последующей эксплуатации сооружения.

При этом особое внимание уделяется расчетам усилий взаимодействия конструкций моноблоков при монтаже и прочности этих конструкций, объем и содержание которых тесно увязываются со специальными конструктивно-технологическими мерами, способствующими высокому качеству стыковки и сборки сооружений. Объем и содержание этих расчетов тесно увязываются со специальными организационно-техническими мероприятиями, также обеспечивающими высокое качество стыковки и сборки сооружений. Рассмотрим их основные особенности.

Работы [4, 5] были посвящены разработке методов расчета медленно изменяющихся во времени (статических) усилий взаимодействия, вызванных балластировкой и дебалластировкой ОО и СБТС с расположенным на нем ВС. Однако помимо статических усилий в условиях волнения (даже при малой его интенсивности) возникают значительные динамические усилия из-за относительных перемещений ОО и СБТС при качке и их соударений, обусловленных наличием зазоров между контактными поверхностями моноблоков. Несмотря на существенное влияние динамических усилий на прочность стыкуемых конструкций и на безопасность проведения операции монтажа в целом, в настоящее время отсутствуют публикации, содержащие расчетные или экспериментальные оценки этих усилий, а также методы их расчета. Поэтому целью настоящей работы является оценка динамических усилий при стыковке моноблоков в условиях волнения и разработка упрощенного метода для быстрой и малозатратной оценки таких усилий. Достижение этой цели обеспечит возможность надежной реализации (при создании новых ППБУ) основных элементов ранее освоенной технологии строительства морских платформ из моноблоков.

Организационно-технические мероприятия по ограничению усилий, возникающих при стыковке

Organizational and technical measures to restrict the forces during mating

Перед установкой ВС на ОО последнее должно быть надежно раскреплено на рабочей площадке с помощью якорно-швартовых линий. Затем производится позиционирование объектов стыковки (ВС и ОО). СБТС с ВС перемещают в пространство между колоннами ОО для подготовки к фазе стыковки (рис. 2, 3). После того как судно расположено непосредственно над опорной структурой и пришвартовано, выполняется предварительное наведение (совмещение) верхней и нижней частей стыковочного устройства. При этом опоры (элементы стыковочного устройства) ВС должны быть совмещены с опорами блока. Для наведения ВС на ОО используются буксиры, лебедки или комбинация этих технических средств. Совмещение конструкций производится по реперным точкам или на основе индикации, обеспечиваемой оптическими или лазерными системами.

После наведения верхнее строение с помощью операции быстрой балластировки судна (или дебалластировки опорного основания ППБУ) опускается на колонны ОО. При этом в балластные цистерны поступает большое количество воды, что позволяет судну погрузиться (или опорному основанию ППБУ всплыть) и начинать фазу стыковки ОО и ВС, осуществляемую в два приема. Сначала вес ВС частично (примерно 20–30 %) переносится на ОО, а затем, после соединения конструкций ВС и ОО с помощью сварки, осуществляется полный перенос веса ВС и окончательная посадка ВС на ОО. В процессе такой стыковки и соединения ВС с ОО сваркой должны быть обеспечены, во-первых, принудительное совмещение контуров сварки благодаря деформированию конструкций ОО под действием сил веса ВС и, во-вторых, прочность конструкций стыкуемых моноблоков при воздействии как статических, так и динамических нагрузок, обусловленных морским волнением.

Нужно провести расчеты, подтверждающие надежность закрепления и позиционирования объекта при погодных условиях, соответствующих как операции стыковки, так и выполнению сборочно-сварочных работ.

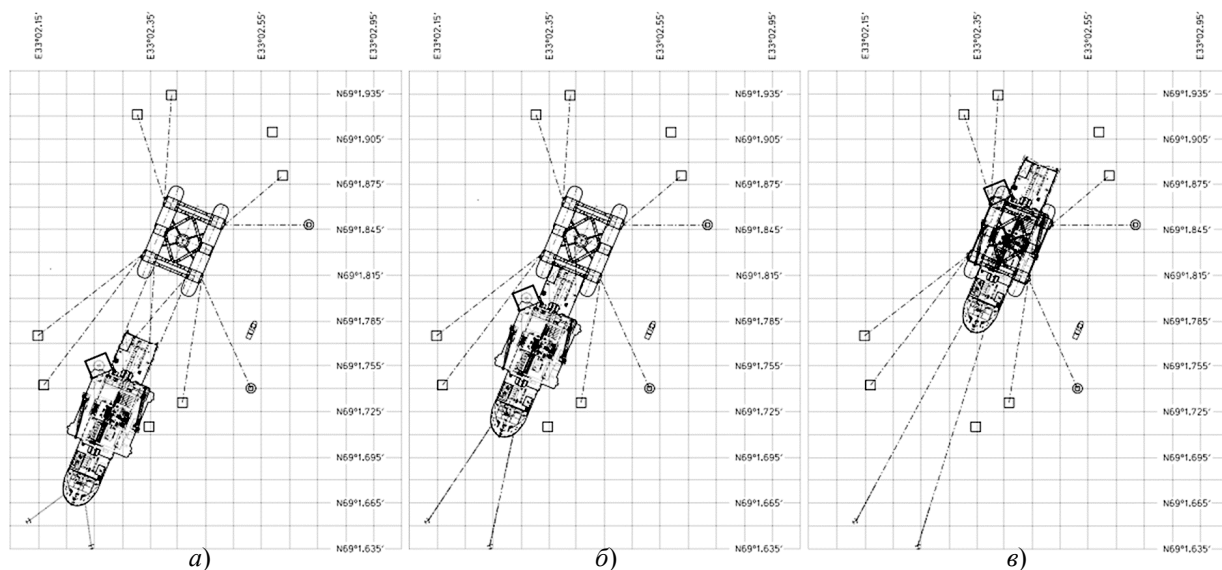


Рис. 2. Положение судна с верхним строением относительно опорного основания в процессе заведения судна в пространство между стабилизирующими колоннами: а) в начале процесса; б) в середине; в) в конце процесса

Fig. 2. *Black Marlin* position with respect to substructure, as this heavy-lifter with topsides aboard is being led to the space between stabilizing pillars: a) at the beginning of operation; b) in the middle of it; c) at the end of the operation

Опыт проведения морских операций стыковки свидетельствует о необходимости дополнительных важных мероприятий по снижению нагруженности конструкций ВС [2]:

1. назначение и строгое выдерживание технологических допусков на точность расположения и совмещения стыкуемых поверхностей ОО и ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
2. предотвращение больших перекосов и эксцентриситетов стыкуемых поверхностей при деформировании конструкций под действием сил, преобладающих изменения в процессе стыковки;
3. установление расчетных ограничений по ветру и волнению на проведение стыковочных операций;
4. установление ограничений на продолжительность операции;
5. обеспечение достаточной защиты моноблоков и состыкованного объекта от роста ударных нагрузок и от повреждений (использование привальных брусов (рис. 4) и зашивки деревом, стальных пружин, гидравлических или пневматических амортизаторов и демпферов, полиспадов, удерживающих тросов и канатов, упоров, ограничивающих продольное относительное перемещение ОО и ВС, и т.д.).



Рис. 3. Заход саморазгружающегося большегрузного транспортного судна с расположенным на нем верхним строением в пространство между колоннами опорного основания для подготовки к фазе стыковки

Fig. 3. *Black Marlin* with topsides aboard led into the space between substructure pillars to get ready for assembling

Отметим, что выполнение последних трех мероприятий обеспечивает в основном уменьшение динамических усилий взаимодействия ОО и ВС, а первых двух – снижение как статических, так и динамических усилий.

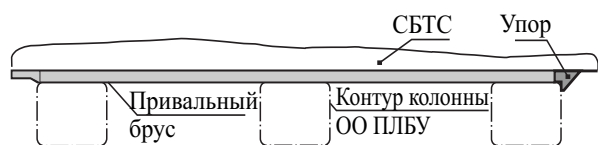


Рис. 4. Схема установки привального бруса и упора с правого борта саморазгружающегося большегрузного транспортного судна и его контактов со стабилизирующими колоннами опорного основания при окончании процесса заведения судна в пространство между ними (вид сверху)

Fig. 4. Black Marlin has fender guard and props installed at her starboard and touches stabilizing pillars of the substructure at the end of her lead-in to the space between them (top view)

Регламентация ветро-волновых условий и продолжительности проведения операции стыковки

Assignment of metocean conditions and duration of mating

Система приема/откачки балласта должна обеспечивать:

- выполнение операции стыковки за срок, ограниченный окном погоды (как правило, не более 48 часов), для чего нужно использовать производительные насосы;
- выравнивание крена и дифферента СБТС посредством несимметричного приема/откачки балласта для компенсации любого перемещения центра тяжести.

В зависимости от расчетной продолжительности морские операции подразделяются на:

- операции, не ограниченные по погодным условиям (продолжительностью свыше 72 часов);

Понижающий коэффициент a для интенсивности волнения
 Reduction coefficient for wave intensity

Расчетная продолжительность операций T_p в часах	Расчетная высота волн трехпроцентной обеспеченности, м		
	$1,3 < h_{3\%} < 2,6$	$2,6 < h_{3\%} < 5,2$	$h_{3\%} > 5,2$
$T_p < 12$	0,68	0,76	0,80
$12 < T_p < 24$	0,63	0,71	0,75
$24 < T_p < 48$	0,56	0,64	0,67
$48 < T_p < 72$	0,51	0,59	0,63

- операции, ограниченные по погодным условиям (продолжительностью менее 72 часов).

Операция продолжительностью свыше 72 часов рассматривается как ограниченная по погодным условиям, если она может быть прервана в процессе выполнения, а объект – отведен в защищенное место при превышении допускаемых критериев гидрометеорологических условий.

Расчетное время проведения операции T_p определяется по формуле $T_p = T_n + T_c$, где T_n – нормативное (проектное) время выполнения рассматриваемой операции; T_c – превышение нормативного времени, обусловленное случайными природными и техногенными факторами.

Превышение T_c нормативного времени, обусловленное случайными факторами, назначается с учетом особенностей технологии стыковочных работ и статистической изменчивости погодных условий их проведения. Обычно оно принимается не большим, чем нормативное время проведения операции T_n , но не меньшим 6 часов.

Для морских операций, ограниченных по погодным условиям, расчетное нормативное время T_n может устанавливаться в каждом конкретном случае в задании на проектирование, исходя из конструктивных особенностей объекта, технических возможностей имеющихся судов обеспечения и т.п. Начало таких операций обусловлено наличием допускаемых погодных условий и их благоприятным прогнозом.

При проведении морских операций стыковки необходимо учитывать нестабильность (статистическую изменчивость) гидрометеорологической обстановки и неточность прогнозов погоды. В принципе, подобный учет можно производить путем увеличения расчетных нагрузок на конструкции ВС и ОО, тем самым снижая риск срыва проведения операций. Однако в практике морского монтажа платформ подобный риск принято снижать, уменьшая допускаемую интенсивность волнения и скорость ветра во время проведения морской операции по сравнению с расчетными значениями, принятыми в проекте. Допускаемые показатели интенсивности волнения и осредненной (анемометрической) скорости ветра снижаются относительно принятых в проекте при расчетах статических и динамических нагрузок. Понижающий коэффициент для допускаемой осредненной скорости ветра принимается равным $a = 0,8$; a для допускаемой высоты волны трехпроцентной обеспеченности $h_{3\%}$ – в соответствии с таблицей [2].

Для морских операций продолжительностью свыше 72 ч, которые могут быть отнесены к операциям, ограниченным по погодным условиям, при определении допускаемых проектных погодных условий должна учитываться общая (суммарная) продолжительность всех отдельных этапов. Критерии допускаемых погодных условий (осредненная скорость ветра и интенсивность волнения $h_3\%$) для таких операций устанавливаются отдельно в каждом конкретном случае.

Расчетные условия для операций на плаву, не ограниченных по погодным условиям (продолжительностью свыше 72 ч), должны приниматься исходя из статистических данных по экстремальным условиям для конкретного района проведения операции. Критерии допускаемых погодных условий для выполнения таких операций могут приниматься равными расчетным (проектным).

Компьютерное моделирование взаимодействия моноблоков и судна при монтаже полупогружной буровой установки и особенности расчета динамических усилий

Computer-based simulation of interaction between modules and ship in the process of semisubmersible floater assembling and dynamic force calculation specifics

Основные расчетные случаи нагружения опорных блоков определялись из неформального анализа следующих процессов:

- позиционирование баржи с находящимся на ней ВС над ОО;
- балластировка баржи (или дебалластировка ОО) и ее погружение до достижения необходимого технологического зазора (контакта) под сварку на соединяемых контурах ВС и ОО;
- качка ОО и судна с ВС в условиях морского волнения, воздействия на судно и моноблоки ветра и течения;
- силовое деформирование стыковочных устройств под действием сил веса ВС и вследствие волнения;
- изменение зазоров (между частями стыковочных устройств, расположенными на ВС и ОО, между привальным брусом и колоннами ОО, между опорной поверхностью ВС и опорно-транспортными устройствами типа Spacer beam, расположенными на палубе судна)

вплоть до их исчезновения, сопровождающегося ударами;

- наличие вызванных волнением упругих колебаний связанной системы «ВС – ОО – СБТС».

Следует отметить, что расчетная оценка динамичности нагрузок в настоящее время возможна только на основе численных методов и крайне затруднена из-за отсутствия программных продуктов, позволяющих создать математическую модель, обеспечивающую высокий уровень точности вычислений. В данном случае наиболее предпочтительно использование для такой оценки программного комплекса *Anchored structures* [6, 7], предназначенного для математического моделирования статичности и динамики составных плавучих сооружений, имеющих якорные системы удержания, а также для расчета вызванных волнением гидродинамических нагрузок на плавучие или стационарные сооружения.

Преимущества данного пакета программ для этого случая связаны со следующими возможностями:

- рассматривать анализируемое сооружение как систему, состоящую из нескольких взаимосвязанных частей, задавать параметры этих частей, а также параметры швартовых и отбойных устройств (в частности, привальных брусьев), смягчающих ударные взаимодействия частей сооружения за счет плавного упругого сжатия устройств и частичного поглощения энергии удара (рис. 5); пластическое деформирование конструкций и их возможное разрушение при этом не учитывается;
- производить расчет нелинейных жесткостных характеристик якорных связей разнообразных

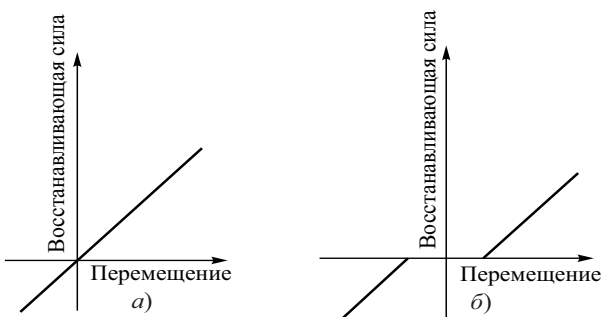


Рис. 5. Различия в зависимостях восстанавливающей силы, возникающей при взаимодействии колонны опорного основания с закрепленным на судне привальным брусом, от перемещения при отсутствии зазоров в отбойном устройстве для смягчения ударов (а) и при их наличии (б)

Fig. 5. Restoring force-versus displacement in the interaction between substructure support and *Black Marlin* fender guard without impact-mitigation clearances (a) and with them (b)

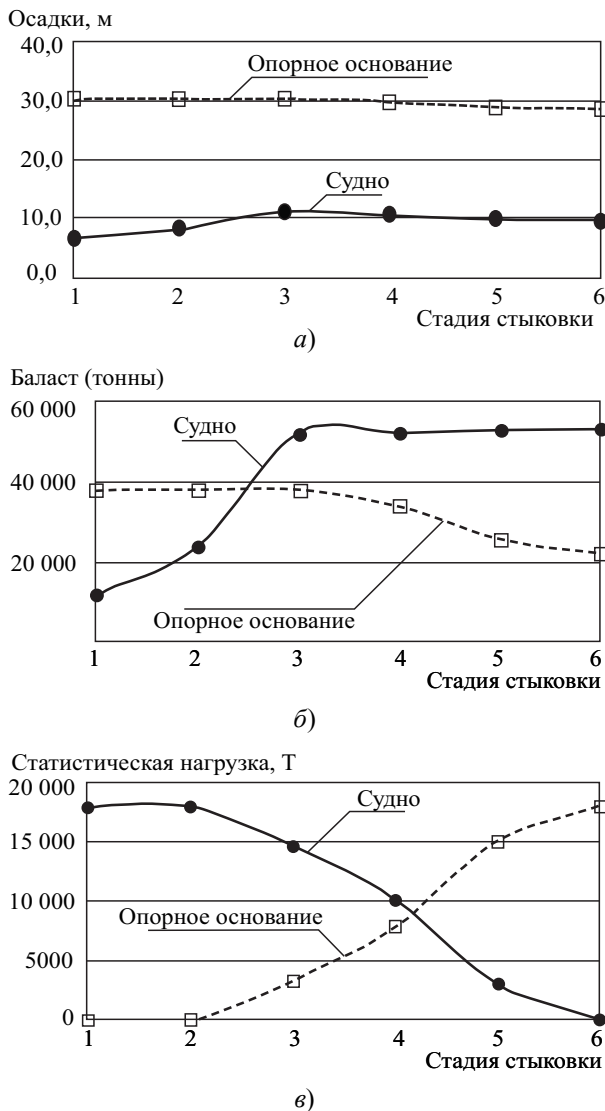


Рис. 6. Изменение осадок опорного основания и судна (а), количества балласта (б) и статической нагрузки на колонны опорного основания и на палубу судна (в) на различных стадиях проведения стыковки верхнего строения с опорным основанием

Fig. 6. a) Draught changes of the substructure and the ship; b) changes in their respective amounts of ballast; c) static load on substructure pillars and ship deck at different stages of topsides assembling with substructure

типов, учитывать нелинейность зависимости силовых реакций элементов связанной системы «судно + ВС + ОО» на относительные перемещения моноблоков и судна, динамичность поведения элементов и объекта в целом;

- производить расчет статических и динамических (регулярных и нерегулярных) нагрузок на рассматриваемые плавучие и стационарные сооружения от ветра, течения и волнения (причем с учетом взаимовлияния составных частей сооружения);
- проводить расчет статических и динамических перемещений объектов, натяжений якорных связей, усилий в швартовных и отбойных устройствах в пространственной нелинейной постановке во временной области с учетом наличия возможных зазоров в механической системе (рис. 5). При анализе нагрузок во временной области производится численное интегрирование системы нелинейных дифференциальных уравнений объектов с полным учетом вышеперечисленных факторов;
- управлять работой программы в интерактивном (диалоговом) режиме (способом сбора данных, параметрами спектрального и вероятностного анализа, заданием внешних воздействий);
- производить статистический анализ амплитуд колебаний объектов и усилий в связях по заданной обеспеченности экстремальных параметров.

Точность результатов расчетов с помощью программного комплекса несколько снижается из-за отсутствия надежных математических моделей движения жидкости при ударах судна об опорные блоки, сопровождающихся срывами крупномасштабных вихрей, однако она все же приемлема для выполнения приближенных инженерных оценок.

Важной особенностью программного комплекса является возможность изменять параметры стыкуемых моноблоков и образуемого ими сооружения, учитывать переменность инерционных, жесткостных и демпфирующих свойств этих объектов при их балластировке, изменении их осадки на различных стадиях стыковки моноблоков (рис. 6), зазоров в отбойных и стыковочных устройствах. Схема используемой при этом математической модели исследуемой системы представлена на рис. 7.

Результаты расчетного исследования

Results of analytical study

Результаты расчетного анализа различных стадий стыковки с использованием программного комплекса показали, что при относительно малой интенсивности волнения основными факторами, влияющими на величины усилий взаимодействия моноблоков между собой и ВС с СБТС, являются высота волны трех-

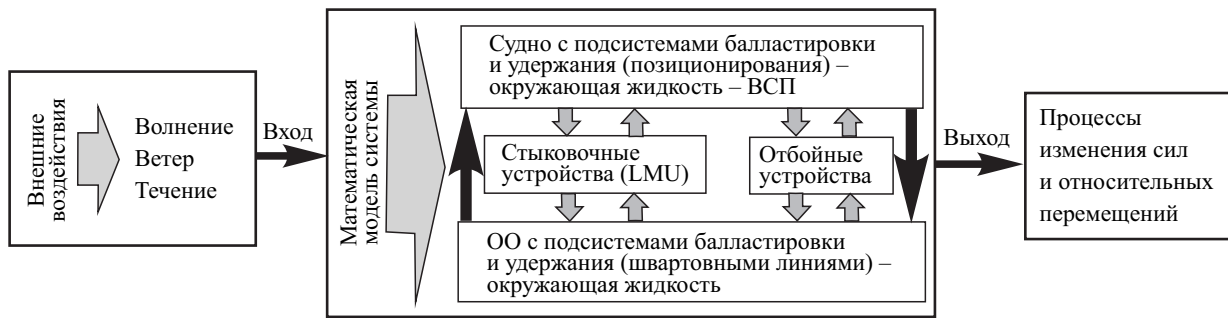


Рис. 7. Структурная схема математической модели объекта во время его монтажа из моноблоков в море

Fig. 7. Structural layout of the platform's mathematical model during sea mating of its modules

процентной обеспеченности $h_3\%$, курсовой угол основного распространения волн по отношению к диаметральной плоскости судна, средняя частота волнения и скорость ветра. Анализируя возможные режимы волнения, всегда можно указать наиболее неблагоприятные, в которых диапазон средних периодов близок к частотам основного или гармонического резонанса бортовой качки СБТС. Для развитого волнения можно в качестве зависимых величин принять среднюю скорость ветра и высоту волны $h_3\%$. При таких предположениях, характерных для наиболее

неблагоприятных (однако сильно ограниченных по величине $h_3\%$) погодных условий, с практической точки зрения при оценке усилий взаимодействия стыкуемых объектов достаточно учитывать всего два основных фактора – интенсивность волнения $h_3\%$ и курсовой угол.

Из результатов расчетов также видно, что наибольшие величины усилий взаимодействия ОО с ВС и стыкуемого объекта (ОО + ВС) с палубой судна наблюдаются при боковом направлении бега волн по отношению к судну, при котором судно

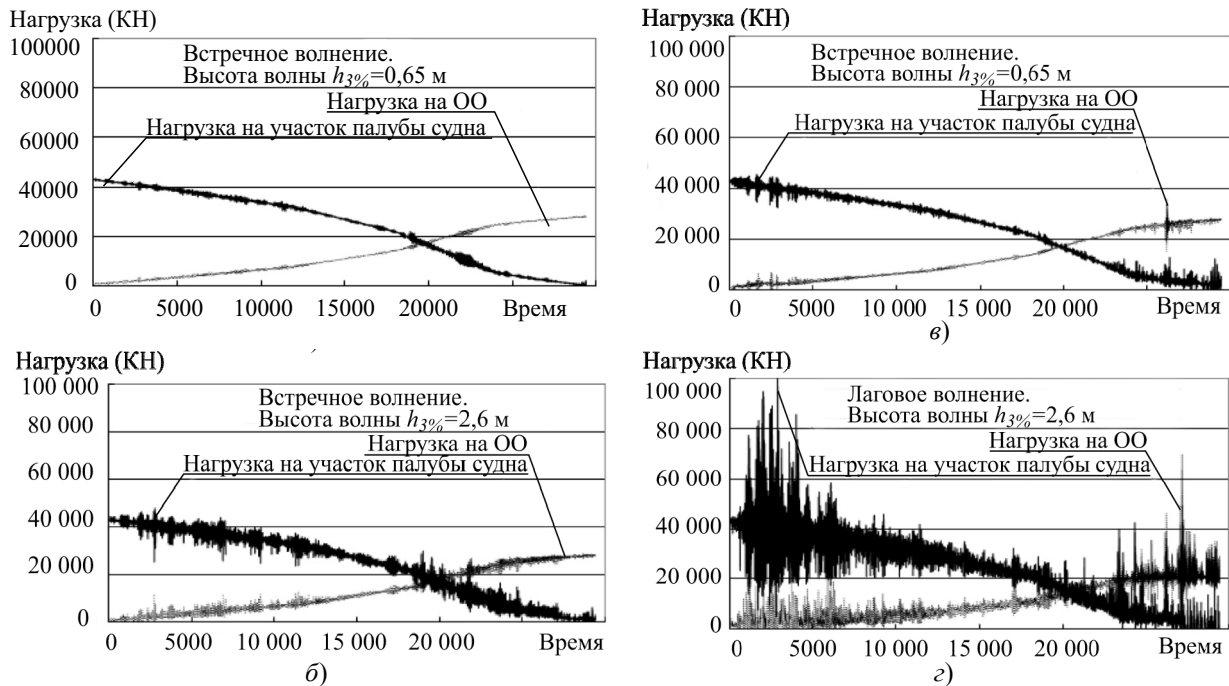


Рис. 8. Процессы изменения суммарных вертикальных усилий взаимодействия, вызванных статическим и динамическим нагружением при стыковке верхнего строения с опорным основанием

Fig. 8. Changes in total vertical interaction forces due to static and dynamic loads in the process of topsides mating with substructure

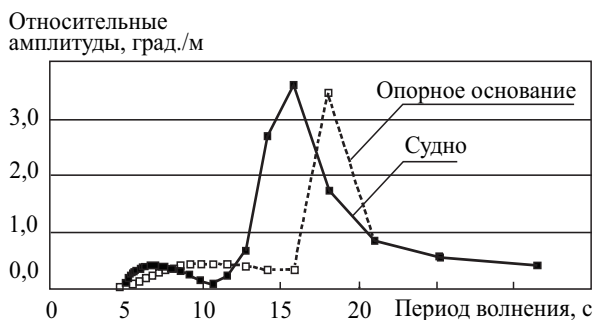


Рис. 9. Зависимости относительных (отнесенных к амплитудам волн) амплитуд бортовой качки судна с верхним строением и опорным основанием от периода лагового волнения

Fig. 9. Relative rolling amplitudes of ships (as fractions of wave amplitudes) with topsides and substructure aboard versus beam wave period

с находящимся на нем строением и раскрепленное ОО испытывают более интенсивную бортовую и вертикальную качку. Эти результаты приведены на рис. 8 в виде реализаций процессов воздействия вертикальных сил на колонну ОО и на палубу судна, наблюдаемых при стыковке в условиях лагового и встречного волнения с разными высотами волн трехпроцентной обеспеченности, равными 2,6 и 0,65 м. Эти силовые воздействия реализуются при средних периодах волнения, превышающих 6 с. Таким периодам соответствуют длины волн, сопоставимые с шириной ОО или превышающие ее. На таком волнении происходит заметное возбуждение бортовой и вертикальной качки (рис. 9).

Представленные на рис. 8 реализации процессов позволяют сделать несколько выводов об их свойствах. Во-первых, это нестационарные случайные процессы, для которых характерно изменение во времени математического ожидания и дисперсии. Временные зависимости математических ожиданий процессов имеют тот же характер, что и изображенные на рис. 6в функции, отражающие особенности изменения статической нагрузки на колонны ОО и на палубу судна на различных стадиях проведения стыковки. Во-вторых, динамические эффекты (ударные взаимодействия) наиболее отчетливо проявляются на начальных и конечных стадиях стыковки (при начале переноса веса ВС на ОО и при его завершении). Это обстоятельство находит отражение в увеличении дисперсий случайных процессов в начале и в конце стыковочной операции, т.е. тогда, когда наблюдаются ударные явления, обусловленные большой изменчивостью зазоров между кон-

струкциями ВС и ОО (в начале), а также между опорно-транспортными устройствами типа Spacer beam, расположенными на палубе судна, и опорными контурами ВС (в конце). В-третьих, с ростом интенсивности волнения увеличивается статистическая изменчивость процессов (повышается отношение стандарта процесса к математическому ожиданию). Максимальные значения амплитуд примерно линейно растут с увеличением высоты волны $h_{3\%}$.

Оценка динамичности нагрузок и приближенный способ их оценки

Variability assessment of loads and approximate method to estimate them

В качестве важных характеристик ударного взаимодействия ВС и ОО (точнее, верхних и нижних частей стыковочных устройств), а также ВС и палубных опорно-транспортных устройств можно рассматривать отношение максимального значения амплитуды динамической составляющей вертикальной силы взаимодействия к силе веса ВС. В дальнейшем будем называть это отношение коэффициентом динамичности k_d .

Результаты расчета коэффициента k_d с помощью математического моделирования приведены на рис. 10; здесь же рисунке представлены линейные зависимости между этим коэффициентом и интенсивностью волнения $h_{3\%}$, имеющие вид

$$k_d = c_d \frac{h_{3\%}}{V^{1/3}}, \quad (1)$$

где V – объемное водоизмещение ОО в начале пересадки на него ВС; c_d – безразмерный коэффициент, принимаемый равным 2,4 при расчете нагрузок на опорные блоки и 3,3 при расчете нагрузок, действующих на палубу СБТС.

Приведенная формула справедлива при $h_{3\%} / V^{1/3} \leq 0,10$ и при одновременном выполнении изложенных выше рекомендаций по осуществлению организационно-технических и конструктивно-технологических мероприятий по ограничению усилий, возникающих при стыковке, в частности при ограничении в процессе изготовления моноблоков технологических допусков на линейные размеры порядка 25 мм. Она может быть использована для приближенной оценки динамических нагрузок на колонны ОО (рис. 10а) и на палубу СБТС при стыковке ВС с ОО. Максимальная динамическая нагрузка при этом определяется путем

умножения коэффициента динамичности K_d на вес ВС. Для оценки суммарных нагрузок на колонны ОО на палубу к полученному результату необходимо прибавить статическую нагрузку, изменяющуюся во времени, как показано на рис. 6в.

Нагруженность палубы СБТС особенно велика на начальной стадии стыковки. Важно подчеркнуть, что силовые воздействия на палубу при стыковке могут быть сопоставимы (или даже превосходить) с воздействиями в процессе перевозки ВС к месту проведения морской операции стыковки.

Основные выводы

Conclusion

В результате численных расчетов динамического взаимодействия моноблоков (ОО и ВС) в процессе сборки из них ППБУ «Полярная звезда» в условиях малого морского волнения, ветра и течения установлено следующее:

- при допускаемой по условиям морского монтажа сооружения интенсивности волнения (с высотой волны трехпроцентной обеспеченности не более 2,6 м) имеют место значительные динамические нагрузки, действующие на палубу СБТС, на контактные поверхности ОО и ВС; динамические нагрузки на палубу составляют до 33 % от веса ВС и сопоставимы по величине с нагрузками при перевозке ВС судном в условиях волнения, допустимого по правилам транспортировки;
- выявлены характерные особенности случайных процессов динамического взаимодействия моноблоков между собой и с судном при монтаже ППБУ;
- оценено влияние интенсивности волнения и направления бега волн на динамические нагрузки;
- на основе результатов систематических численных расчетов предложены приближенные зависимости для оценки максимальных динамических нагрузок на палубу судна и на колонны ОО в процессе сборки ППБУ из моноблоков в условиях малого морского волнения.

Библиографический список

1. Крыжевич Г.Б., Попов Н.Г. Монтаж плавучих буровых установок методом надвига на плаву с деформированием конструкций опорного основания // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2016. № 44/45. С. 32–40.
2. Правила разработки и проведения морских операций НД 2-090601-004. СПб.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2014.
3. Алферов В.И., Крыжевич Г.Б., Подгорный Л.Н., Попов Н.Г., Шапошиников В.М. Опыт разработки проекта морской перевозки супермодулей полупогружной буровой установки «Полярная звезда» и технологии их сборки в морских условиях // Труды Крыловского государственного научного центра. 2011 Вып. 65(349). С. 5–16.
4. Крыжевич Г.Б. Усилия в стыковых устройствах и напряжения в конструкциях, возникающие при монтаже плавучих буровых платформ наплавным способом // Морские интеллектуальные технологии. 2016. № 4(34). Т. 1. С. 20–27.
5. Крыжевич Г.Б., Попов Н.Г. Разработка методов оценки усилий в обеспечении безопасного морского монтажа полупогружных и стационарных платформ // Морской вестник. 2017. Специальный выпуск № 1(13). С. 66–70.

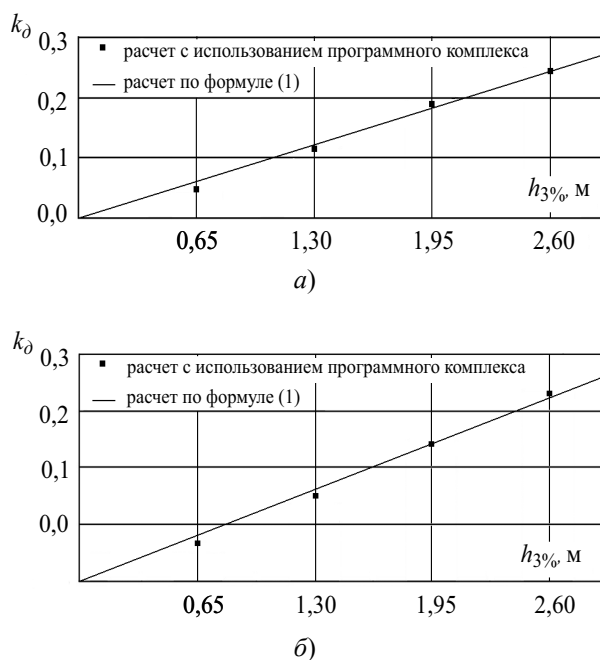


Рис. 10. Зависимости максимальных значений коэффициентов динамичности для нагрузок на колонны опорного основания (а) и на палубу саморазгружающегося большегрузного транспортного судна (б) от высоты волны трехпроцентной обеспеченности $h_{3\%}$

Fig. 10. Maximum dynamic coefficients for loads suffered by substructure pillars (a) and heavy-lifter deck (b) versus wave height of 3 % occurrence, $h_{3\%}$

6. Программный комплекс «Anchored structures». Руководство пользователя А.В.00001-03-81-01-ЛУ. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016.
7. *Большев А.С., Фролов С.Л., Кутейников М.А.* Математическое моделирование поведения морских плавучих объектов в программном комплексе «Anchored Structures» // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2013. № 36. С. 68–90.

References

1. *Kryzhevich G., Popov N.* Float-over assembly of drilling rigs at sea with substructure constructions deformation // RS Compendium of papers. 2016. No. 44/45. P. 32–40 (*in Russian*).
2. RS Rules for Planning and Execution of Marine Operations, ND No. 2-090601-004. SPb.: Russian Maritime Registry of Shipping, 2014 (*in Russian*).
3. *Alferov V., Kryzhevich G., Podgorny L., Popov N., Shaposhnikov V.* Experience of planning sea transportation of supermodules for Polyarnaya Zvezda semisubmersible drilling rig and technologies of their mating at sea. // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2011. Issue 65(349). P. 5–16 (*in Russian*).
4. *Kryzhevich G.* Forces in mating devices and structural stresses during float-over of marine drilling rigs //

- Marine Intellectual Technologies. 2016. No. 4(34). Vol. 1. P. 20–27 (*in Russian*).
5. *Kryzhevich G., Popov N.* Development of force assessment methods in support of safe sea assembling of semisubmersible and fixed offshore platforms // Morskoy Vestnik. 2017. Special issue No. 1(13). P. 66–70 (*in Russian*).
6. Anchored Structures. User manual. А.В.00001-03-81-01-LU. St. Petersburg State Polytechnical University, 2016 (*in Russian*).
7. *Bolshev A., Frolov S., Kuteinikov M.* Mathematical simulation of marine floating facilities behavior in Anchored Structures software package // RS Compendium of papers. 2013. No. 36. P. 68–90 (*in Russian*).

Сведения об авторе

Крыжевич Геннадий Брониславович, д.т.н., профессор, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-46-74. E-mail: G_Kryzhevich@ksrc.ru.

About the author

Gennady B. Kryzhevich, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-46-74. E-mail: G_Kryzhevich@ksrc.ru.

Поступила / Received: 14.08.18
Принята в печать / Accepted: 08.11.18
© Крыжевич Г.Б., 2018