

Simulation of the Initial Stability of the Floating Dock for the List and Trim Stabilization Tasks

Kondratenko Y.P.¹, Topalov A.M.², Kozlov O.V.²

¹Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The aim of this work is the development and study of a mathematical model of the floating dock initial stability for solving problems of list and trim stabilization. The proposed model allows calculating the change of the parameters of the initial stability of the floating dock (with and without a vessel) for different values of the draft. The initial stability of the real floating dock of the middle class with a carrying capacity of 8500 tons is studied using the simulation model developed by the authors in the FREE!SHIP Plus. With the help of this computational model, the operation of immersion of the floating dock is considered. At each stage of immersion at a certain draft, the parameters of the initial stability of the floating dock are calculated, namely, the values: transverse and longitudinal metacentric heights, centers of buoyancy, centers of gravity, and mass displacement. Corrections of transverse and longitudinal metacentric heights due to changes in the mass of liquid in ballast tanks and the influence of its free surface are also taken into account. Based on the obtained modeling results, the following dependences are calculated: a) moments from list and trim angles at different values of draft, b) moments of list and trim from draft at various values of list and trim, c) angles of list and trim from the fill level of the respective tanks. These dependences can be used for further development of the list and trim stabilization system for the given floating dock.

Keywords: floating dock; initial stability; list; trim; simulation.

DOI: 10.5281/zenodo.3239200

Simularea stabilității inițiale a unui doc plutitor pentru probleme de stabilizare a unghiului de tăiere și înclinației

Kondratenko Yu.P.¹, Topalov A.N.², Kozlov A.V.²

¹ Universitatea Națională „Petru Moșhila” din Marea Neagră, Nicolaev, Ucraina

²Universitatea Națională de Construcții Navale numită după amiralul Makarov, Nicolaev, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a elabora și studia un model matematic al stabilității inițiale a unui doc plutitor pentru rezolvarea problemelor de stabilizare a unghiului de tăiere și înclinației. Acest obiectiv este realizat prin dezvoltarea unui model care permite calcularea variației parametrilor stabilității inițiale a docului plutitor (cu și fără navă) pentru diferite valori ale pescajului. Noutatea lucrării constă în studierea stabilității inițiale a unui doc plutitor real, folosind modelul de simulare dezvoltat de autori în pachetul software FREE! SHIP Plus conceput pentru a simula conturul structurilor plutitoare și a navelor care utilizează tehnologia NURBS pentru a determina statica, propulsia și alți parametri ai hidrodinamicii. Pe baza unui model de simulare care ține cont de dimensiunile reale și de nelinearitatea suprafețelor docului plutitor și a vasului, se ia în considerare o operațiune de scufundare a docului plutitor. În fiecare etapă de imersiune la o anumită scufundare se calculează parametrii stabilității inițiale a docului plutitor, adică valorile: înălțimi metacentrice transversale și longitudinale, centrele de mărime, centrele de greutate, deplasarea maselor. Se iau în considerare și corecțiile înălțimilor metacentrice transversale și longitudinale datorate schimbărilor în masa fluidului în rezervoarele de balast și influența suprafeței sale libere. Pe baza rezultatelor obținute la simulare, se calculează dependențele: a) momentele față de unghiul de tăiere pentru diferite valori ale scufundării, b) momentele unghiului de tăiere pentru diferite valori ale acestora, c) unghiurile de tăiere și scufundare funcție de nivelul umplerii rezervoarelor respective.

Cuvinte-cheie: docuri plutitoare; stabilitate inițială; unghi de tăiere; scufundare; simulare pe calculator.

Моделирование начальной остойчивости плавучего дока для задач стабилизации крена и дифферента

Кондратенко Ю.П.¹, Топалов А.Н.², Козлов А.В.²

¹ Черноморский национальный университет имени Петра Могилы, Николаев, Украина

²Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина

Аннотация. Целью работы является разработка и исследование математической модели начальной остойчивости плавучего дока для решения задач стабилизации крена и дифферента. Поставленная цель достигается благодаря разработки модели, которая позволяет рассчитывать изменение параметров начальной

остойчивости плавучего дока (с судном и без) при различных значениях осадки. Новизна работы состоит в исследовании начальной устойчивости реального плавучего дока с помощью разработанной авторами имитационной модели в программном комплексе FREE!SHIP Plus, предназначенном для моделирования обводов плавучих сооружений и судов по технологии NURBS с целью определения показателей статике, ходкости и других параметров гидродинамики. На основе имитационной модели, учитывающей реальные размеры и нелинейность поверхностей плавучего дока и судна, рассматривается операция погружения плавучего дока. На каждом этапе погружения при определённой осадке рассчитываются параметры начальной устойчивости плавучего дока, а именно значения: поперечной и продольной метацентрических высот, центры величины, центры тяжести, массовое водоизмещение. Также учтены поправки поперечной и продольной метацентрических высот вследствие изменения массы жидкости в балластных танках и влияния её свободной поверхности. На основе полученных результатов моделирования рассчитаны зависимости: а) моментов от угла крена и дифферента при различных значениях осадки, б) моментов крена и дифферента от осадки при различных значениях крена и дифферента, в) углов крена и дифферента от уровня заполнения соответствующих танков. Значимость результатов состоит в том, что полученные зависимости могут быть использованы для дальнейшей разработки системы стабилизации крена и дифферента приведенного плавучего дока путем учета перераспределения жидкости среди балластных отсеков. Разработанную математическую модель начальной устойчивости целесообразно использовать в дальнейших исследованиях при проектировании и настройке высокоэффективных систем стабилизации крена и дифферента плавучих доков различных классов.

Ключевые слова: плавучий док; начальная устойчивость; крен; дифферент; компьютерное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Плавучий док представляет собой сложное инженерное сооружение, предназначенное главным образом для подъема и спуска судна. В плавучем доке проводят технический осмотр, обслуживание, текущий и аварийный ремонт подводной части корпуса судна и винто-рулевого комплекса [1].

При доковании судна плавучий док сталкивается с проблемами равновесия [1,2]. Как правило, собственный вес судна передается через киль-блоки палубе понтона, в результате могут произойти наклоны и нарушения прочности плавучего дока. Поэтому прогиб, перегиб и углы наклона (крен и дифферент) плавучего дока должны быть ограничены в пределах допустимого диапазона, чтобы обеспечить безопасность эксплуатации судоподъемного сооружения.

Для устранения критической деформации плавучего дока и нежелательных наклонов перед докованием судна проводят расчеты балластирования дока. Эти расчеты, прежде всего, определяют подбор балласта в понтонах плавучего дока, причем цель расчетов – получение такого распределения балласта, при котором крен и дифферент дока равны нулю, а момент, изгибающий систему док-судно, меньше допустимого значения для данного плавучего дока. Необходимо иметь в виду, что при большом запасе грузоподъемности дока, выгибающие моменты, которые действуют на систему док-судно, можно полностью устранить путем

выравнивания нагрузки на каждый понтон за счет жидкого балласта.

Для обеспечения высокой эффективности и безопасности выполнения операций погружения и всплытия плавучего дока необходимо на стадии проектирования системы стабилизации углов крена и дифферента провести исследования параметров начальной устойчивости плавучего дока с помощью математического моделирования [2]. В научно-технической литературе имеется определенное количество публикаций в области моделирования различных морских объектов [3-8]. Математическое описание плавучих сооружений и судов различных классов подробно рассмотрено в работах [4, 5, 7]. В частности, в [7] приведены результаты математического моделирования движения морских объектов, а также рассмотрены задачи статике и динамики. В свою очередь, в работах [9-11] представлены расчеты гидродинамики и прочности корпусов плавучих доков и сооружений, а в [12-15] получены результаты моделирования доковых операций погружения и всплытия с постановкой судна в док. Также, в работах [16-23] представлены математические и имитационные модели различных компонентов систем автоматического управления осадкой, креном и дифферентом плавучих доков. При этом исследователями активно применяются методы компьютерного моделирования [24] в программных приложениях Multisurf, Maxsurf, AutoShip,

NavCAD, что обусловлено достаточно высокой точностью расчетов параметров морских объектов, имеющих криволинейные поверхности.

Компьютерное моделирование морских объектов позволяет значительно сократить количество экспериментальных исследований и время, необходимое на их проведение, что делает его эффективным и низкостоимостным инструментом. Поэтому разработка эффективных технологий компьютерного моделирования для расчета параметров начальной остойчивости плавучего дока во время его погружения и всплытия является актуальной задачей.

Моделирование плавучего дока (на основе расчетной модели) с детальной проработкой всех поверхностей и надстроек требует неоправданно больших затрат времени и вычислительных ресурсов. Поэтому решение задач моделирования требует применения специальных подходов, позволяющих упростить исходную модель и в то же время учесть все необходимые особенности плавучего дока с достаточной для практических целей точностью.

Целью данной работы является разработка и исследование математической модели начальной остойчивости плавучего дока для решения задачи стабилизации крена и дифферента.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ ПЛАВУЧЕГО ДОКА С СУДНОМ

Остойчивость обусловлена способностью плавучего дока, выведенного внешними воздействиями из равновесия, возвращаться в исходное состояние после завершения этого влияния. Основной характеристикой остойчивости является восстанавливающий момент, который должен быть достаточным для того, чтобы плавучий док противодействовал моментам крена и дифферента. Различают поперечную остойчивость, соответствующую наклону в поперечной плоскости (крен), и продольную остойчивость, соответствующую наклону плавучего дока в продольной плоскости (дифферент).

Практикой эксплуатации плавучих доков установлено, что крен плавучего дока в любой момент погружения или всплытия не должен превышать 2 градуса, а дифферент – 1 градус. Более значительные наклоны могут привести

к аварийным смещениям установленного в доке судна. Соскальзывание судна с кильблоковой дорожки не может произойти раньше, чем крен достигнет $6,5^\circ$. При доковании по-мальтийски (в случае наклона плавучего дока в $2,5^\circ$ - 3°) ослабевшие распорные могут начать выпадать и дальнейший рост крена создаст опасность падения судна на стапель-палубу.

При доковании поставленного в док судна небольшие значения крена являются некритическими, и при крене в пределах $0,5^\circ$ передоковывать судно нецелесообразно. Но если во время откачки балласта судно после посадки на кильблоковую дорожку начнет существенно крениться (крен превысит $0,5^\circ$), то следует принять соответствующие меры – заново погрузить док до всплытия судна.

Основными внешними воздействиями, которые способны вызвать крен или дифферент плавучего дока являются: силы, возникающие при постановке судна в док, когда их диаметрально плоскости не совпадают; неправильная загрузка судна при его постановке в док; силы давления ветра. Действие сил этих трех групп можно избежать при правильном доковании судна.

На рис. 1 приведены положения плавучего дока с судном при крене и дифференте. При незначительном крене (вызванном моментом крена $M_{кр}$) положение центра тяжести G не меняется, а центр величины вследствие изменения формы объема подводной части перемещается из точки C в точку C_1 . Вес системы док-судно и сила поддержки создают определенный момент, направленный против момента крена. Этот момент называется восстановительным моментом M_θ . Аналогичным образом при дифференте плавучего дока (вызванном моментом дифферента M_d) создается восстановительный момент M_ψ .

Под действием момента крена $M_{кр}$ (или дифферента M_d) плавучий док наклоняется с увеличением (вместе с углом наклона Θ или Ψ) соответствующего восстановительного момента M_θ (M_ψ) до значения, которое уравнивает воздействие приложенного момента крена (дифферента).

Под действием двух различных и противоположно направленных моментов плавучий док будет иметь некоторый угол наклона. Как только действие момента крена или дифферента прекращается, восстановительный момент вернет плавучий док в первоочередное положение равновесия.

$$h = r + z_C - z_G, \quad (3)$$

где r – поперечный метацентрический радиус; z_C и z_G – аппликаты, соответственно, центра величины C и центра тяжести G .

При этом

$$r = \frac{I_k}{V}, \quad (4)$$

где I_k – момент инерции плоскости ватерлинии относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести G ; V – объемное водоизмещение плавучего дока, м³.

Также из рис. 1,а следует, что $h = r - a$, где a – расстояние от центра величины C к центру тяжести G . Тогда

$$M_\theta = Dh \sin \theta = D(r - a) \sin \theta. \quad (5)$$

В данном случае предполагается, что метацентр при крене не перемещается. Это возможно при условии, если кривая центра величины является частью окружности. Для надводных плавучих сооружений это условие выполняется только в пределах малых углов крена или деферента, поэтому метацентрическую формулу остойчивости можно использовать только при малых углах крена или деферента. Таким образом, восстанавливающий момент при малых углах крена линейно зависит от их значений.

Аналогичным образом из рис. 1,б следует, что при продольных наклонах плавучего дока

$$M_\psi = DH \sin \psi = D(R - a) \sin \psi. \quad (6)$$

Продольная метацентрическая высота определяется как

$$H = R + z_C - z_G, \quad (7)$$

где R – продольный метацентрический радиус. При этом

$$R = \frac{I_d}{V}, \quad (8)$$

где I_d – момент инерции плоскости ватерлинии относительно поперечной оси, проходящей через центр тяжести; V – объемное водоизмещение плавучего дока, м³.

Кроме того, для определения метацентрических высот необходимо

учитывать поправки в результате приема или расхода балласта и влияния свободной поверхности воды в балластных отсеках плавучего дока.

Поправка при приеме или расходе балласта определяется как

$$\Delta F_1 = \frac{p}{D+p} \left(T + \frac{\Delta T}{2} - E - z_p \right), \quad (9)$$

где p – масса жидкого груза; D – водоизмещение; T – начальная осадка; ΔT – изменение осадки при приеме или расходе жидкого груза; E – начальная метацентрическая высота (если поперечная то h , если продольная – H); z_p – центр тяжести жидкого груза.

Поправка для учета свободной поверхности жидкости определяется как

$$\Delta F_2 = -\frac{i_E}{V}, \quad (10)$$

где V – объемное водоизмещение; i_E – момент инерции свободной поверхности жидкости, проходящей через ее центр тяжести относительно продольной оси (для поправки h) или относительно поперечной оси (для поправки H).

Значения метацентрических высот с учетом поправок определяются как

$$\begin{cases} h_n = h + \Delta F_1 + \Delta F_2; \\ H_n = H + \Delta F_1 + \Delta F_2. \end{cases} \quad (11)$$

Соответственно моменты крена и дифферента для плавучего дока имеют вид:

$$\begin{cases} M_\theta = Dh_n \sin \theta; \\ M_\psi = DH_n \sin \psi. \end{cases} \quad (12)$$

Поскольку продольный метацентрический радиус R во много раз больше поперечного метацентрического радиуса r , то продольная метацентрическая высота H во много раз больше поперечной h .

Анализ восстанавливающих моментов (12) показывает, что мерой остойчивости можно считать метацентрические высоты h и H , которые косвенно характеризуют сопротивление плавучего дока моментам крена и дифферента.

Расчет, метацентрических высот считается довольно сложным процессом для многокорпусных плавучих сооружений.

Достаточно точные результаты дают только экспериментальные модельные испытания, хотя и в этом случае желательно использовать модели с размерами, близкими к натуральным [1, 24]. Компьютерное моделирование с помощью FREE!SHIP Plus дает возможность использовать модели размеров реальных объектов.

Программный комплекс FREE!SHIP Plus предназначен для моделирования обводов корпуса по технологии NURBS при исследовании статики, ходкости и параметров гидродинамики для судов, плавучих сооружений и подводных аппаратов.

Авторами разработано в программном комплексе FREE!SHIP Plus имитационную модель (рис. 2), которая соответствует реальному плавучему доку среднего класса грузоподъемностью 8500 тонн [1] со следующими параметрами: ширина $b_d = 32,4$ м; длина $l_d = 139,5$ м; ширина каждой башни

$B_B = 3,13$ м; высота понтона $h_{п} = 4,6$ м; высота плавучего дока $h_d = 12,8$ м; осадка плавучего дока без судна $T_d = 2$ м; количество водяного балласта $M_6 = 18500$ тонн.

Причем максимальная масса дока (массовое водоизмещение) со всем оборудованием составляет $P_{ТПД} = 9253$ тонн. Кроме того, моделирование также проводилось для плоскобортного судна, которое имеет следующие параметры: ширина $B_C = 22,54$ м; длина $L_C = 130$ м; высота $h_d = 7$ м; вес $P_C = 8400$ тонн.

С помощью разработанной расчетной модели рассмотрена операция погружения плавучего дока. На каждом этапе погружения рассчитаны параметры начальной устойчивости плавучего дока.

Таким образом, получены все данные для расчета моментов крена и дифферента, значения которых приравненные к их восстановительным моментам при различных углах наклона плавучего дока.

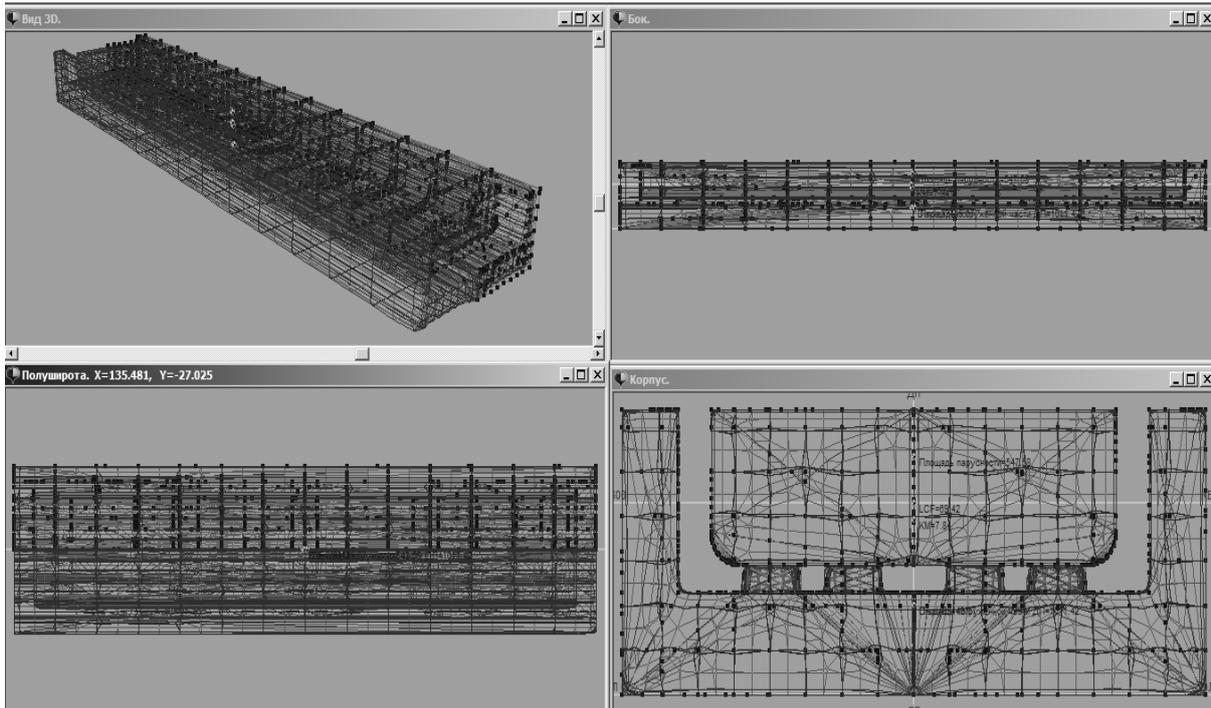


Рис. 2. Расчетная модель системы док-судно в программном комплексе FREE!SHIP Plus.²

$$\begin{cases} M_{кр} = M_{\theta} = Dh_n \cdot \sin \theta; \\ M_d = M_{\psi} = DH_n \cdot \sin \psi. \end{cases} \quad (13)$$

На основе компьютерного моделирования получены практически линейные зависимости

моментов от угла крена и дифферента при различных значениях осадки (рис. 3). Основными этапами осадки плавучего дока приняты: осадка на уровне понтона ($T = 3,83$ м), осадка на уровне кильблоков ($T = 3,83$ м), осадка на уровне башен плавучего дока ($T = 8,25$ м).

² Appendix 1

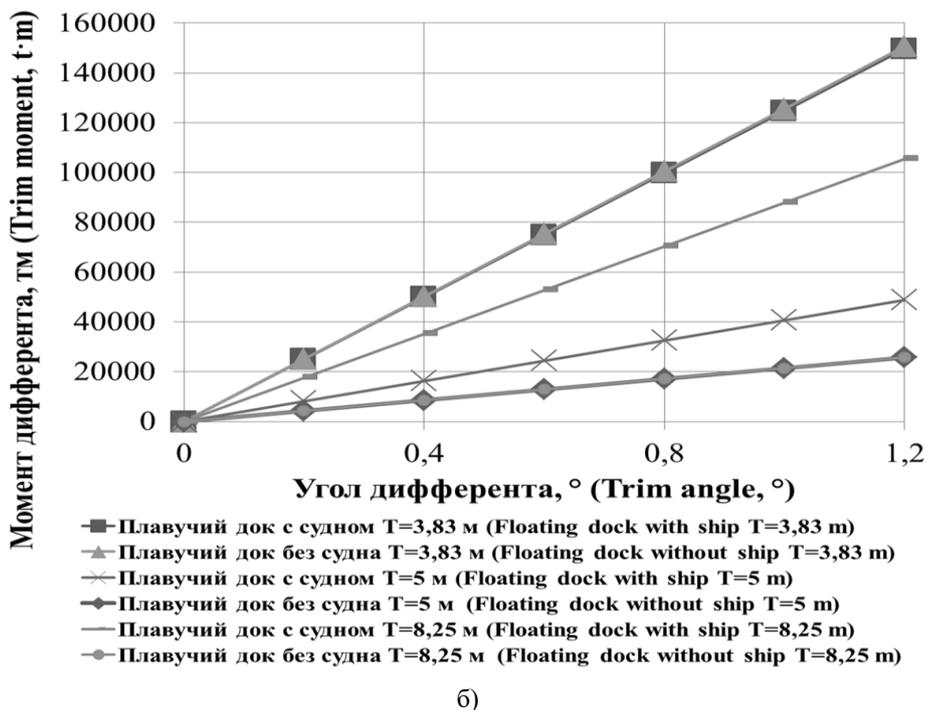
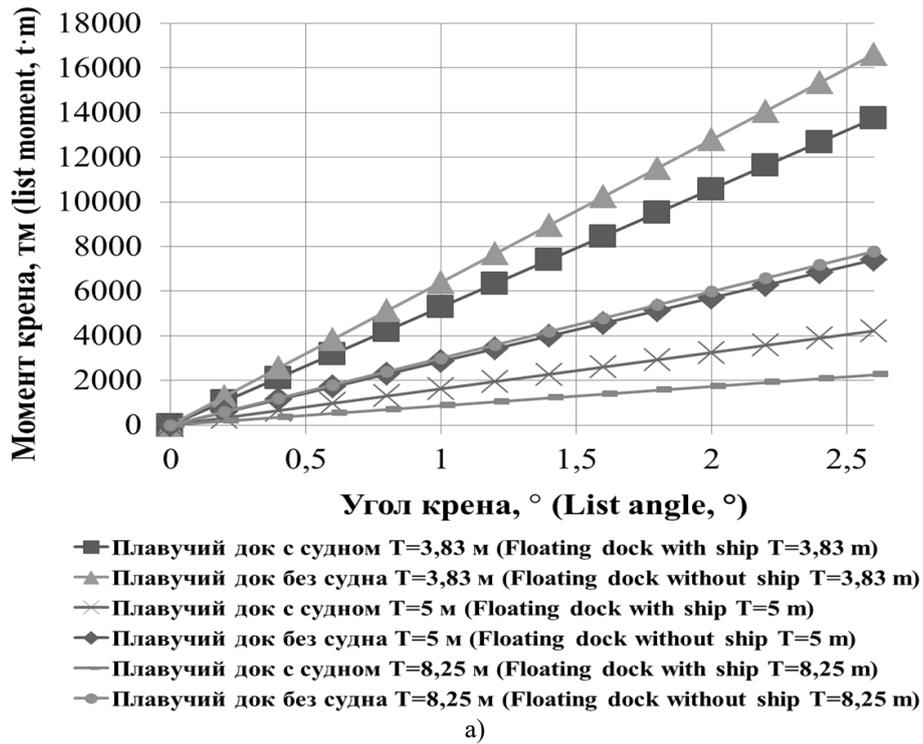


Рис. 3. Зависимости моментов от угла наклона плавучего дока:
а) при крене; б) при дифференте.³

³ Appendix 1

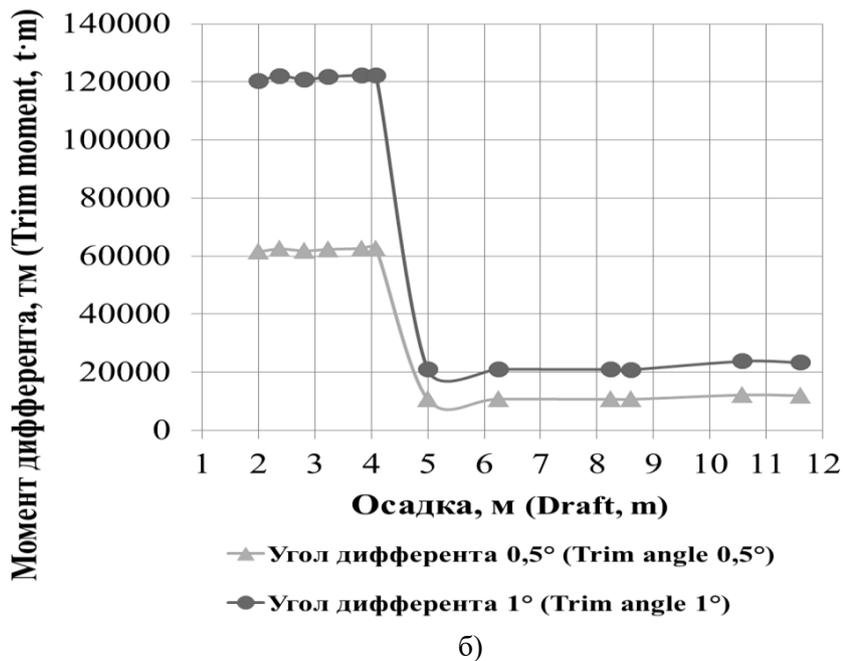
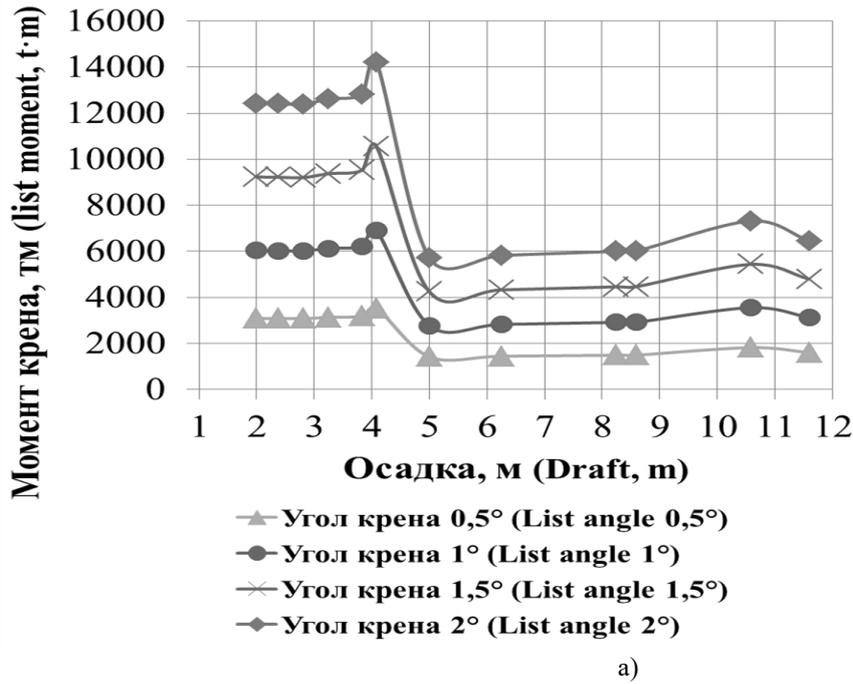


Рис. 4. Зависимости моментов от осадки плавучего дока: а) при крене; б) при дифференте.⁴

На основании полученных данных рассчитаны также зависимости моментов крена и дифферента от осадки при различных значениях крена и дифферента (рис 4).

Из графиков (рис. 4, а, б) видно, что процесс погружения плавучего дока начинается с осадки 2 м (осадка плавучего дока порожнем).

При постепенном увеличении балласта в понтоне плавучий док начинает погружаться. При этом центр тяжести смещается вниз, что

приводит к увеличению остойчивости и росту значений

моментов крена и дифферента, особенно это заметно при угле крена в 2°. После достижения осадки 4,6 м (осадка погруженного понтона) начинается процесс погружения кильблоковой дорожки и башен плавучего дока. При этом значительно уменьшается площадь ватерлинии плавучего дока, что снижает метацентрические высоты плавучего дока. Вследствие данных изменений

⁴ Appendix 1

существенно уменьшаются значения моментов крена и дифферента. Далее значения моментов крена и дифферента плавучего дока стабилизируются и практически не меняются. При осадке 8,6 м балластные танки понтона полностью заполняются, соответственно уменьшается площадь свободной поверхности жидкости и метacentрические высоты плавучего дока растут. При этом значения

моментов также увеличиваются. В дальнейшем, в результате стремительного заполнения балластных танков башен, имеющих значительно меньший объем, чем объем в понтоне, достигается предельная осадка плавучего дока в 11,6 м. При этом значения моментов принимают конечные величины.

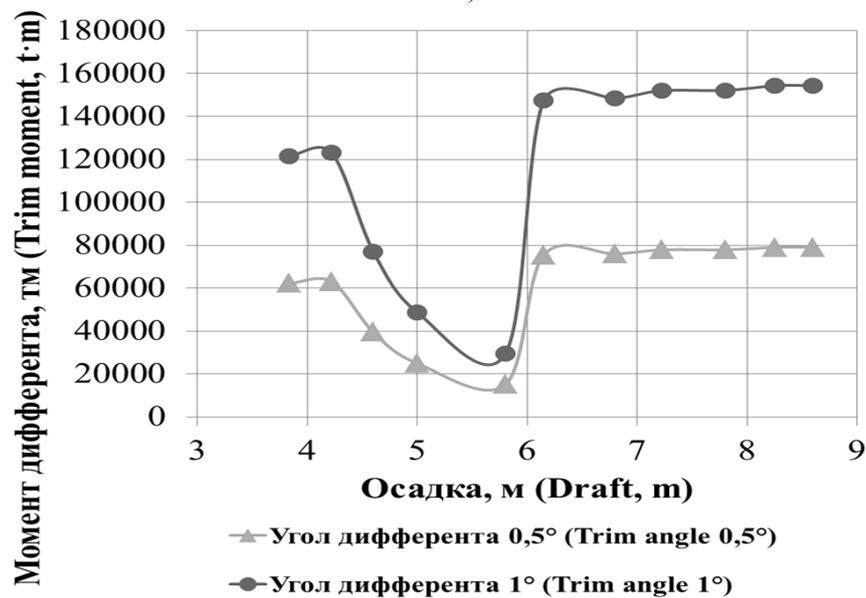
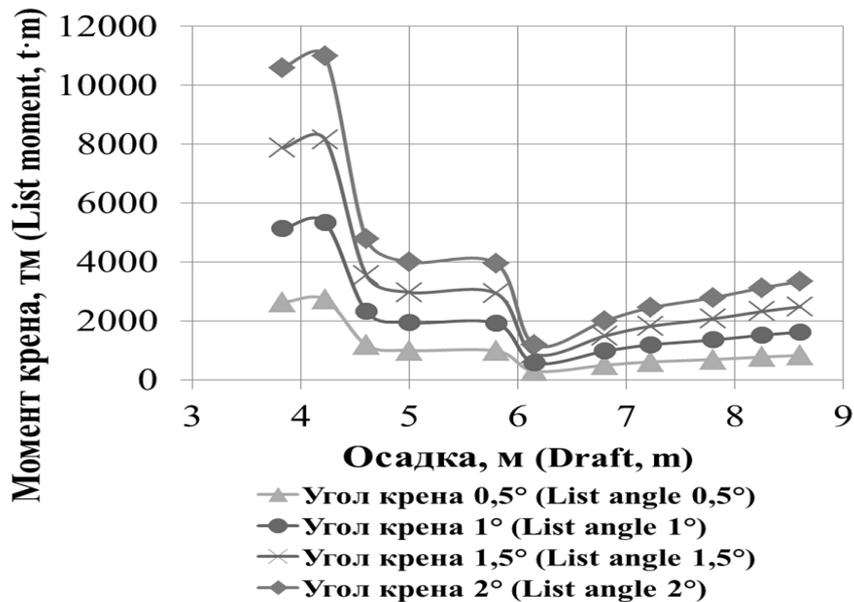


Рис. 5. Зависимости моментов от осадки плавучего дока с судном:
а) при крене; б) при дифференте.⁵

Для учета влияния судна на показатели начальной устойчивости плавучего дока, проведено моделирование случая погружения

плавучего дока с поставленным на кильблоки судном. Получены зависимости для моментов

⁵ Appendix 1

крена и дифферента от осадки при различных значениях крена и дифферента (рис 5).

Из графиков (рис. 5, а, б) видно, что процесс погружения плавучего дока начинается с осадки 3,83 м (осадка плавучего дока с судном порожнем). Под действием веса судна и увеличения балласта, плавучий док начинает погружаться, соответственно центр тяжести смещается вниз, что приводит к увеличению устойчивости и росту значений моментов крена и дифферента. После достижения осадки 4,6 м (осадка погруженного понтона) начинается процесс погружения кильблоковой дорожки и башен плавучего дока, соответственно значительно уменьшается площадь ватерлинии плавучего дока, что снижает метацентрические высоты плавучего дока. Вследствие данных изменений существенно уменьшатся значения моментов крена и дифферента. После чего значения моментов крена плавучего дока стабилизируются, и практически не меняется, а значения моментов дифферента постепенно уменьшаются. При достижении осадки 5,8 м. существенно увеличится площадь ватерлинии, которая будет состоять из плоскостей плавучего дока и судна, что существенно увеличит продольную метацентрическую высоту плавучего дока и уменьшит его поперечную метацентрическую высоту. Вследствие данных изменений существенно увеличатся значения моментов дифферента и уменьшатся значения моментов крена. Процесс погружения плавучего дока продолжается до значения осадки 8,6 м. При этом моменты крена плавно увеличиваются, а моменты дифферента стабилизируются.

БАЛЛАСТНАЯ СИСТЕМА ПЛАВУЧЕГО ДОКА И ЗАДАЧИ СТАБИЛИЗАЦИИ УГЛОВ КРЕНА И ДИФФЕРЕНТА

Оценка влияния размещения и массы жидкого груза на моменты крена и дифферента рассмотрена на примере предложенного плавучего дока грузоподъемностью 8500 тонн. Балластная система состоит из четырех ра⁶ Appendix 1 коробок, 20 балластных танков (Н) производительностью 3750 м³/час. В свою очередь, насосы центробежного типа работают с постоянной частотой вращения колес. Приемные трубопроводы имеют диаметр $d_1 = 750$ мм, разветвленный трубопровод балластных танков имеет диаметр $d_2 = 350$ мм. Все

клинкеты имеют мотор-редукторы 2-10 кВт и выступают в роли регуляторов расхода. Схема расположения балластных танков (БТ) данного плавучего дока приведена на рис. 6. Центральная часть понтона дока содержит балластные танки значительно больших размеров, чем балластные танки, которые находятся в носовой и кормовой частях.

Знак координат расположения балластных танков зависит от оси x : знак «+» соответствует носовому направлению, знак «-» – кормовому. Для оси y : знак «+» соответствует левому борту, знак «-» – правому борту.

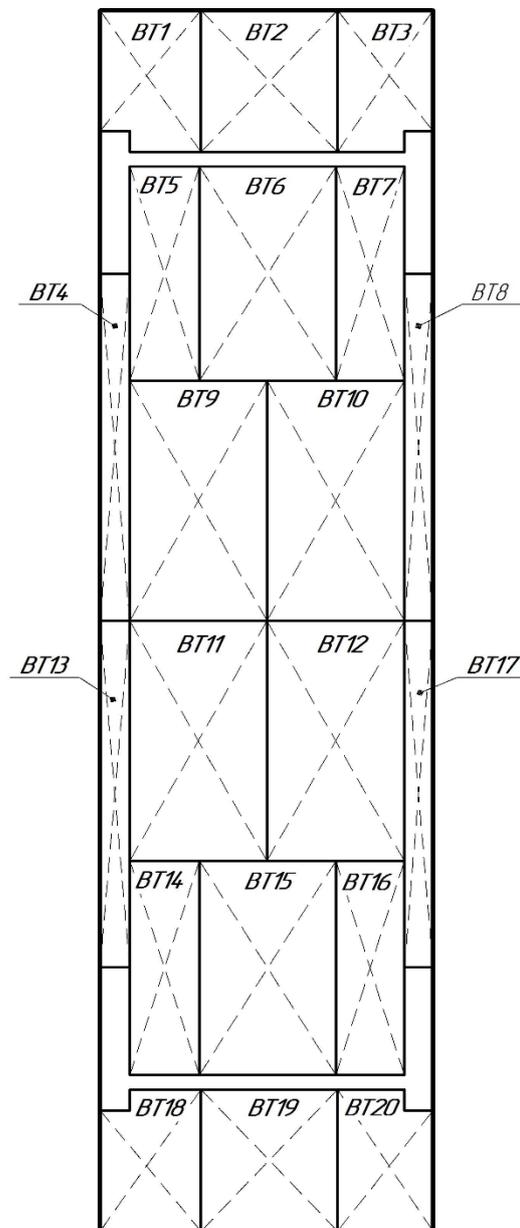


Рис. 6. Схема расположения балластных танков (БТ) плавучего дока.⁶

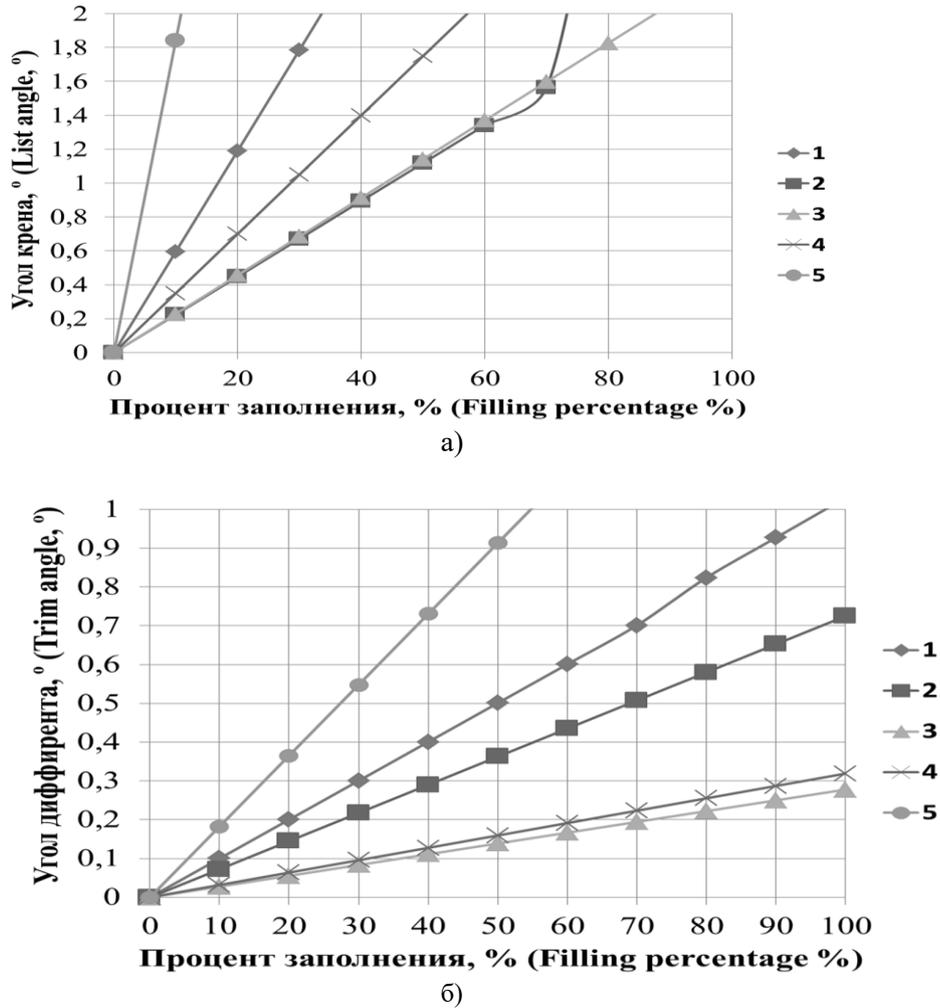


Рис. 7. Зависимость углов крена и дифферента от уровня заполнения балластных танков.⁸

Для расчета стабилизирующих моментов крена и дифферента рассмотрено более подробно влияние жидкого балласта в танках. Причем расчеты проводились для пустого плавучего дока с судном при осадке 3,83 м. Данная осадка является основной для выполнения ремонтных работ на судне в плавучем доке. Для балластировки рассмотрены по 5 позиций заполнения балластных танков, в частности для случаев создания крена на левый борт и дифферента на нос (таблица 1).

Из рис. 7а, б видно, что зависимости между величинами заполнения балластных танков и значениями крена и деферента плавучего дока практически линейные. Нелинейности наблюдаться только с теми группами балластных танков, в которых присутствуют БТ1, БТ18, БТ20. Эти балластные танки имеют разную площадь сечения в понтоне и башне, что приводит к смещению центра тяжести.

Таблица 1⁷.

Варианты заполнения балластных танков

Position number	Floating dock in list on the left side	Floating dock in trim on nose
1	БТ4, БТ13	БТ18, БТ19, БТ20
2	БТ1, БТ18	БТ14, БТ15, БТ16
3	БТ5, БТ14	БТ11, БТ12
4	БТ9, БТ11	БТ13, БТ17
5	БТ4, БТ13, БТ1, БТ18, БТ5, БТ14, БТ9, БТ11	БТ18, БТ19, БТ20, БТ14, БТ15, БТ16, БТ11, БТ12, БТ13, БТ17

^{7,8} Appendix 1

В зависимости от групп заполнения балластных танков получены значения стабилизирующих моментов и их влияние на углы крена и дифферента плавучего дока (рис. 7).

Для создания крена в 2° , можно заполнить следующие балластные группы: 1 группу на 10%, 2 группу на 73%, 3 группу на 87%, 4 группу на 56%, 5 группу на 35%. В свою очередь, для создания дифферента в 1° можно заполнить только две группы балластных танков: 1 группу на 98%, 5 группу на 53%.

Следовательно, стабилизация углов крена и дифферента плавучего дока напрямую оценивается путем соотношения возмущающих и стабилизирующих моментов. Соответственно в качестве показателя остойчивости используются значения составляющих нагрузок относительно влияния жидкого балласта плавучего дока, если момент крена или дифферента окажется меньше допустимого, то остойчивость считается достаточной. В противном случае остойчивость считается недостаточной и необходимо увеличить или уменьшить количество жидкого балласта в соответствующих танках.

Выводы

Разработанная модель позволяет рассчитывать изменение параметров начальной остойчивости плавучего дока (с судном и без) при различных значениях осадки.

Исследования начальной остойчивости реального плавучего дока среднего класса грузоподъемностью 8500 тон проведены с помощью разработанной авторами имитационной модели в программном комплексе FREE!SHIP Plus с учетом размеров дока и судна. В результате компьютерного моделирования получены зависимости: а) моментов от угла крена и дифферента при различных значениях осадки, б) моментов крена и дифферента от осадки при различных значениях крена и дифферента, в) углов крена и дифферента от уровня заполнения соответствующих танков. Данные зависимости могут быть использованы для дальнейшей разработки системы автоматической стабилизации крена и дифферента приведенного плавучего дока.

Разработанную математическую модель начальной остойчивости целесообразно использовать в дальнейших исследованиях при проектировании и настройке высокоэффективных систем стабилизации крена и дифферента плавучих доков различных классов.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Initial stability of the floating dock with the vessel: a) in the case of roll; b) in the case of the diverter

²**Fig. 2.** Calculation model of the dock-ship system in the FREE! Ship Plus

³**Fig. 3.** Dependencies of moments on the angle of inclination of the floating dock: a) with list; b) with trim

⁴**Fig. 4.** Dependence of moments on the floating dock sediments: a) with list; b) with trim

⁵**Fig. 5.** Dependencies of moments on the draft of a floating dock with a vessel: a) with list; b) with trim

⁶**Fig. 6.** Layout of ballast tanks (BT) of floating dock

⁷**Table 1.** Ballast tank filling options

⁸**Fig. 7.** The dependence of the angles of list and trim on the filling level of the ballast tanks

Литература (References)

- [1] Rashkovsky O.S., Shchedrolosov O.V., Ermakov D.V., Uzlov O.M. Proektuvannya, tehnolohiya and orhanizatsiya pobudovy kompozytnykh plavuchykh dokiv [Design, technology and organization of building composite floating docks], 2015, Kherson, 320 p. (In Ukrainian)
- [2] Fukelman V.L. Fundamentals of ship theory. [Osnovy teorii korablya], 1977, Shipbuilding, Leningrad, 247 p. (in Russian).
- [3] Hughes O. F. Ship structural design. A rationally based, computer-aided optimization approach. 2000. Society of Naval Architects. 591 p.
- [4] Rawson K.J., Tupper E.C. Basic Ship Theory Combined Volume 5th Edition. 2001. Butterworth-Heinemann. 784 p.
- [5] Bruce G.J., Eyres D.J. Ship Construction. 2012, Elsevier. 388 p.
- [6] Musca D.G. Static and dynamic stability for floating cranes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi: 10.1088/1757-899X/400/8/082015.
- [7] Lee K. Y., Cha J. H., Park K. P. Dynamic response of a floating crane in waves by considering the nonlinear effect of hydrostatic force *Ship Technology Research*, 2010, vol. 57, no. 1, pp. 62-71.
- [8] Zwaan S., Bernardino A., J. Santos-Victor. Vision based station keeping and docking for floating vehicles. *European Control Conference (ECC)*. 2001, pp. 2910-2915.
- [9] Smith, D.Q., LeVezu, A.P. *Floating Dock Deflection Management Systems*. Patent U.S. No. 8,467,921, 2013.
- [10] Burlacu E., Domnisoru L. Strength investigation of a small size floating dock unit by 3D-FEM models in head design waves. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi:10.1088/1757-899X/400/8/082005.
- [11] Yang G., Liang H., Wu C. Deflection and inclination measuring system for floating dock

- based on wireless networks. *Journal Ocean Engineering*. 2013, Issue 69. pp. 1–8.
- [12] Apostolidis A., Kokarakis J., Merikas A.: Modeling the Dry-Docking Cost: The Case of Tankers. *Journal of Ship Production and Design*, 2012, 28, No. 3, pp. 134–143.
- [13] Lundquist E.A. Science and an Art: Dry Docks Enable Vital Ship Construction, Maintenance and Repair. *Seapower*, 2015, pp. 10–13.
- [14] Dev A.K., Saha M. Modeling and Analysis of Ship Repairing Time. *Journal of Ship Production and Design*, 2015, 31, No. 2, pp. 129–136.
- [15] Kwon J.W., Seo J. Docking Control on Both Stationary and Moving Stations Based on Docking Formation. *Electronics Letters*, 2014, 50, No. 6, pp. 436–438.
- [16] Burlacu E., Pacuraru F., Domnisoru L. On the development of design software for floating dock units operating capabilities analysis. *Mechanical Testing and Diagnosis*. 2017, 7(1), pp. 5- 17
- [17] Valery V. Korotaev, Anton V. Pantiushin, Mariya G. Serikova, Andrei G. Anisimov. Deflection Measuring System for Floating Dry Docks. *Ocean Engineering*, 2016, Volume: 117, Pergamon, pp. 39-44.
- [18] Yu Y., Meng Q., Wang L., Yin B., Li P. Kinematics of parallel-series position and pose adjustment mechanism for automated docking system of replenishment at sea. *The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*. 2010. pp. 2273-2276.
- [19] Zhukov Y., Gordeev B., Zivenko A., Nakonechniy A. Polymetric Sensing in Intelligent Systems. Chapter in the book: *Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation*. 2015, River Publishers, pp. 211-234.
- [20] Wang F. Study on closed-loop gain shaping control of floating dock control system. *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*. 2010, Volume: 3, pp. 53 -55.
- [21] Wang F. Study on Mixed Sensitivity Control of Floating Dock Control System. *International Conference on Electrical and Control Engineering*. 2010, pp. 5641-5642.
- [22] Qian C., Hong W. Intellectual control of floating dock's immersion. *Ship Boat*, 2007, No 1, pp. 43–44.
- [23] Kondratenko Y.P., Kozlov O.V., Korobko O.V., Topalov A.M. Synthesis and Optimization of Fuzzy Control Systems for Floating Dock's Docking Operations. Chapter in the book: *Fuzzy Control Systems*, 2017, Nova Science Publishers, pp. 141–213.
- [24] Alyamovsky A. A. SolidWorks Simulation. How to solve practical problems [SolidWorks Simulation. Kak reshat prakticheskie zadachi], 2012, BHV- Petersburg, Saint Petersburg, – 488 p. (in Russian).

Сведения об авторах.



Кондратенко Юрий Пантелеевич,
д.т.н., профессор, профессор кафедры интеллектуальных информационных систем ЧНУ им. П. Могилы.
E-mail: y_kondrat2002@yahoo.com



Козлов Алексей Валерьевич,
к.т.н., доцент кафедры компьютеризированных систем управления НУК им. адм. Макарова, г.. Николаев,
E-mail: kozlov_ov@ukr.net



Топалов Андрей Николаевич,
преподаватель кафедры компьютеризированных систем управления НУК им. адм. Макарова, г.. Николаев,
E-mail: topalov_ua@ukr.net