

УДК 629.12:519.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОГИДРОУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГИБКОГО ОГРАЖДЕНИЯ БАЛЛОНЕТНОГО ТИПА С ВОДНЫМ И ВОЗДУШНЫМ ПОТОКАМИ В СОСТАВЕ НЕСУЩЕГО КОМПЛЕКСА АМФИБИЙНОГО СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

© 2013 г. Л.А. Игумнов¹, А.В. Туманин², П.С. Кальясов², А.М. Крыжанов³

¹ Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского,

² Судостроительная компания «Аэроход», Нижний Новгород,

³ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

isadymacar@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.11.2012

Рассматривается математическое моделирование аэрогидроупругого взаимодействия гибкого ограждения баллонетного типа амфибийных судов на воздушной подушке с водной и воздушной средами. Приводятся результаты численного моделирования формы баллонета и аэрогидродинамических нагрузок, действующих на баллонет в составе несущего комплекса судна на воздушной подушке.

Ключевые слова: аэрогидроупругость, математическое моделирование, судно на воздушной подушке, гибкое ограждение, аэрогидродинамические нагрузки.

Введение

Аэрогидроупругое взаимодействие гибкого ограждения (ГО) с водным и воздушным потоками при движении судна на воздушной подушке (СВП) на крейсерских режимах сказывается на ходовых качествах и ресурсных характеристиках ГО. Сдерживающим фактором для корректного учета этого взаимодействия на стадиях проектирования СВП является целая совокупность проблем: нестационарный характер действующих на ГО сил, пространственный тип задачи, контактное взаимодействие элементов ГО, как между собой, так и с подстилающей поверхностью, значительная геометрическая и физическая нелинейности задачи.

Существующие методы расчета параметров ГО основаны на безмоментной теории оболочек [1]. Расчет проводится при следующих допущениях:

- деформации материала считаются пренебрежимо малыми, материал ГО полагается гибким, невесомым и не обладающим изгибной жесткостью;
- расчет обычно базируется на рассмотрении статического или квазистатического напряженного состояния;
- избыточное давление в надувных элементах ГО и воздушной подушке (ВП) принимается распределенным равномерно;

- форма ГО определяется в рамках гипотезы плоских поперечных сечений, при этом рассматривается плоская задача равновесия гибкой невесомой нити под постоянной и равномерно распределенной нагрузкой.

Перечисленные допущения положены в основу работ ряда работ В.В. Кличко [2], Э.А. Паравяна [3], В.Э. Магулы [4] и ведут к значительной идеализации расчетных схем.

Использование современных методов вычислительного эксперимента позволяет отойти от указанных выше предположений и рассмотреть сопряженную модель взаимодействия гибкой конструкции ГО с водной и воздушной средами. При этом возникает возможность параметрического исследования формы ГО, определяемой давлением в ВП и давлением закачанного в изолированные элементы ГО воздуха, силами тяжести, силами от внешнего аэрогидродинамического обтекания ГО, истечения воздуха из ВП и силами аэрогидродинамического трения. Важной особенностью является то, что результирующая этих сил в данный момент времени зависит от текущей формы ГО, и наоборот, текущая форма ГО зависит от сил, действующих на ГО в данный момент.

В настоящей работе рассматривается моделирование аэрогидроупругого взаимодействия гибкой конструкции ГО СВП с водной и воздушной средами, которое базируется на мето-

дах современной вычислительной механики и позволяет более точно приблизиться к описанию физики реального процесса.

Математическое моделирование взаимодействия упругой конструкции и жидкости

Рассмотрим трехмерную область (рис. 1), состоящую из двух подобластей, представляющих собой жидкость Ω_F и упругую конструкцию Ω_S . Индексы F и S обозначают здесь и далее жидкость и упругую конструкцию соответственно. Объединение этих областей представляет собой расчетную область $\Omega = \Omega_F \cup \Omega_S$. Введем обозначения для трех поверхностей: жидкости Γ_F , твердого тела Γ_S и общей (интерфейсной) границы жидкости и твердого тела $\Gamma_{F/S} = \partial\Omega_F \cap \partial\Omega_S$.

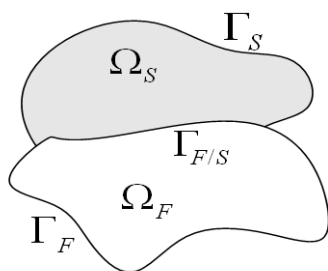


Рис. 1. Схема взаимодействия жидкости и упругой конструкции

В упрощенном виде система уравнений взаимодействия жидкости и упругой конструкции может быть записана в следующем виде [5]:

$$\begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SF} \\ K_{FS} & K_{FF} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_S \\ x_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_S \\ f_F \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Решение указанной системы в единой постановке (monolithic approach) [6] для реальных задач с учетом геометрических и физических нелинейностей в условиях пространственных турбулентных течений зачастую не представляется возможным из-за различий в самой физике рассматриваемых процессов. Поэтому наиболее перспективным является так называемый разделенный подход (partitioned approach), в рамках которого соотношения для жидкости и упругого тела решаются в различных специализированных расчетных программах. В этом случае динамика упругой конструкции и жидкости описывается уравнениями, связь которых осуществляется посредством правых частей:

$$K_{SS} \cdot x_S^t = f_S - K_{SF} \cdot x_F^{t-1}, \quad (2)$$

$$K_{FF} \cdot x_F^t = f_F - K_{FS} \cdot x_S^t \quad (3)$$

В рамках разделенного подхода можно выделить два класса задач: слабосвязанные и сильносвязанные. При использовании слабосвязанного подхода уравнения (2), (3) решаются лишь однажды в течение шага по времени, что приводит к последовательности слабосвязанных (явных, прямых) решений [7]. Ввод дополнительного цикла FSI (Fluid Solid Interaction – взаимодействие жидкость – твердое тело) итераций, в котором решение уравнений (2), (3) повторяется до сходимости по силам взаимодействия и перемещениям, приводит к сильно связанным (неявным) решениям [8]. Слабосвязанные, разделенные методы решения наиболее эффективны, если взаимодействие мало или временные масштабы в жидкости и конструкции сильно отличаются. В противоположность этому, для больших перемещений упругой конструкции, несжимаемых жидкостей, полностью заключенных в деформируемую структуру, или в случае, когда значительная масса жидкости движется совместно с конструкцией, должны быть применены сильно связанные разделенные методы решения с итерационным циклом FSI (Fluid Solid Interaction – взаимодействие «жидкость – упругое тело»). В настоящее время имеется ряд публикаций [5, 6], в которых приведено описание инструментов, методик и ряда верификационных задач взаимодействия жидкости и упругой конструкции и, в частности, задач аэрогидроупругости.

В рассматриваемом случае для численного решения задачи аэрогидроупругости применяется разделенный метод решения в сильносвязанной постановке, при котором соотношения для деформируемого тела разрешаются в пакете вычислительной механики ANSYS Mechanical, а соотношения для жидкости – в пакете вычислительной гидрогазодинамики ANSYS-CFX [9].

Описание ГО баллонетного типа

Рассматривается гибкое ограждение ВП так называемого баллонетного типа, свойственное судам нижегородских проектантов и производителей СВП. Баллонетный тип гибкого ограждения отличается от классического наличием бортовых пневматических баллонов – скегов, принимающих под действием внутреннего избыточного давления цилиндрическую форму с конусообразными законцовками.

На рис. 2 представлено СВП с ГО баллонетного типа «Хивус-10», параметры которого ис-

пользовались при последующих расчетах.

Материал ГО – газонепроницаемая ткань на основе поливинилхлорида (ПВХ) с добавкой полиуретана и армированная полиэстером. Композиционный тканевый материал ГО имеет малую жесткость на сжатие и изгиб, а также различные механические характеристики в осевом и окружном направлениях.

Материал является ортотропным, с укладкой нитей основы и утка под углом 90°. Для использования его характеристик в конечно-элементной модели нужно в общем случае определить девять независимых параметров.

Для случая тонкой оболочки с учетом поперечного сдвига их число уменьшается до шести: два модуля упругости I рода, один из коэффициентов Пуассона, модуль сдвига в плоскости оболочки и два продольно-поперечных модуля сдвига. Определение указанных параметров проводилось на основе испытаний образцов материала на растяжение и трехточечный изгиб (рис. 3).

Результаты по экспериментальному определению механических свойств материала скега на начальном участке диаграммы деформирования приведены в таблице 1.



Рис. 2. Амфибийное СВП «Хивус-10» (СК «Аэроход», г.Н.Новгород)

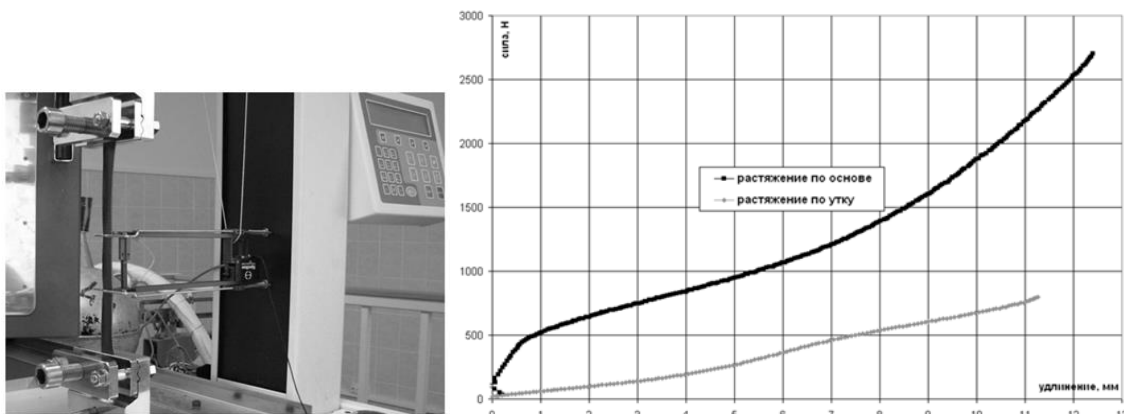


Рис. 3. Испытания образцов на растяжение и диаграмма деформирования

Таблица 1

Модуль упругости вдоль нитей основы E_1 , МПа	1343
Модуль упругости вдоль нитей утка E_2 , МПа	98
Модуль сдвига в плоскости G_{12} , МПа	4.2
Продольно-поперечный модуль сдвига G_{13} , МПа	1.97
Продольно-поперечный модуль сдвига G_{23} , МПа	0.54
Коэффициент Пуассона ν_{12}	0.034
Коэффициент Пуассона ν_{21}	0.46

Задача аэрогидроупругости несущего комплекса амфибийного СВП баллонетного типа

Рассматриваются следующие формы (конфигурации) ГО в соответствии с терминологией [4]:

- *исходная*, соответствующая ненапряженному состоянию, когда ГО чуть поддуто и расправлено (держит форму);
- *начальная*, отвечающая началу рассматриваемого процесса (может совпадать с исходной);
- *конечная* или *деформированная*, принимаемая ГО под нагрузкой.

Задача решается для заданной посадки судна, определяемой углом дифферента и погружением кормового ограждения относительно статического (невозмущенного) уровня воды, а также при различных начальных уровнях давления в нижнем ярусе скега.

Гидродинамическая часть задачи ставится в рамках модели вязкого турбулентного течения несжимаемой жидкости с границами раздела сред, в том числе при прямом моделировании работы нагнетателей СВП. В численной реализации определение мгновенного положения границы раздела сред осуществляется методом объемного слежения (VOF) [10].

В упругой части оболочка считается моментной, с конечными деформациями, рассчитываемыми по модели Рейснера. Масса воздуха, закачанного в ярусы скега, считается постоянной. Расчет внутреннего давления в нижнем и верхнем ярусах скега в деформированной конфигурации проводится по политропному закону на каждом временном шаге связанной задачи.

Схема взаимодействия программ расчета напряженно-деформированного состояния конструкции ГО (ANSYS Mechanical) и гидродинамического расчета (ANSYS CFX) представлена на рис. 4.

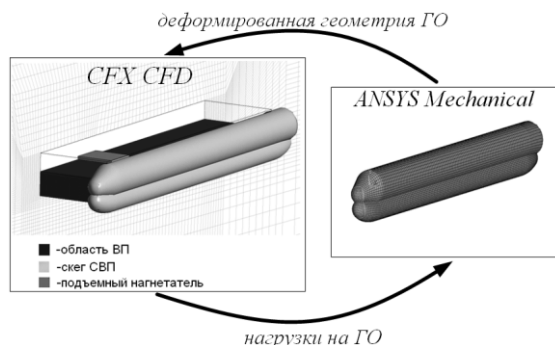


Рис. 4. Схема решения задачи аэрогидроупругости для ГО СВП

Результаты расчетов включают в себя изменение во времени распределений давлений в воздушной подушке амфибийного СВП, распределений внутренних усилий и перемещений по конструкции скега, а также параметры гидродинамического сопротивления ГО. На рис. 5 представлены форма свободной поверхности раздела сред и перемещения скега при движении амфибийного СВП по водной поверхности.

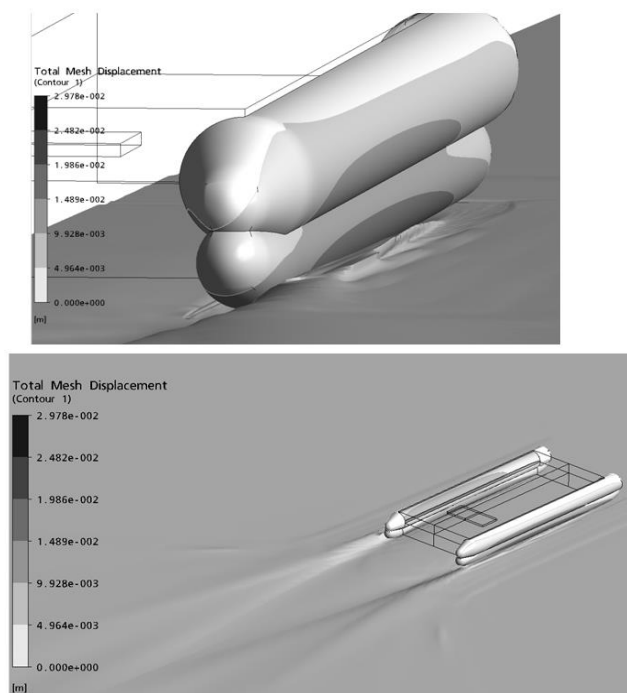
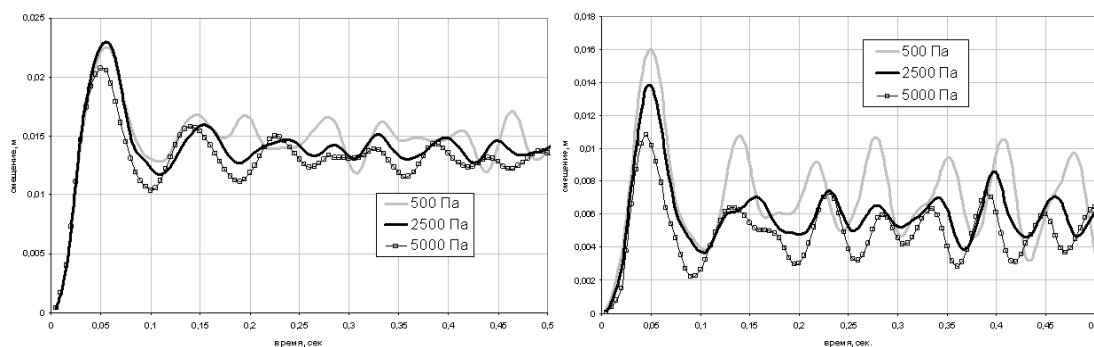


Рис. 5. Поле перемещений баллонета и форма свободной поверхности при движении СВП на крейсерском режиме

Анализ смещений ГО (рис. 6) позволяет говорить о колебательном характере работы ГО даже в условиях эксплуатации СВП при отсутствии ветро-волновых возмущений. Зависимость смещения точки на кормовой части нижнего яруса скега ГО (см. рис. 6) от давления начальной закачки представляется следующим образом: с увеличением начальной закачки уменьшается среднее отклонение и амплитуда относительно начальной конфигурации и увеличивается частота колебаний скега СВП, что косвенно подтверждается результатами натурных испытаний рассматриваемого СВП.

В то же время, прослеживается зависимость нагрузок (рис. 7), действующих на баллонет СВП (подъемной силы, силы сопротивления, момента по дифференту судна) от начального давления: среднее каждого из параметров остается на том же уровне (в том числе и без учета упругости ГО), с ростом давления (начальной закачки баллонета) увеличивается частота изменения аэрогидродинамических нагрузок.



Характерная точка в кормовой части

Характерная точка в носовой части

Рис. 6. Зависимости относительных смещений характерных точек ГО от времени и начальной закачки баллонета при движении СВП на скорости 60 км/ч по водной поверхности

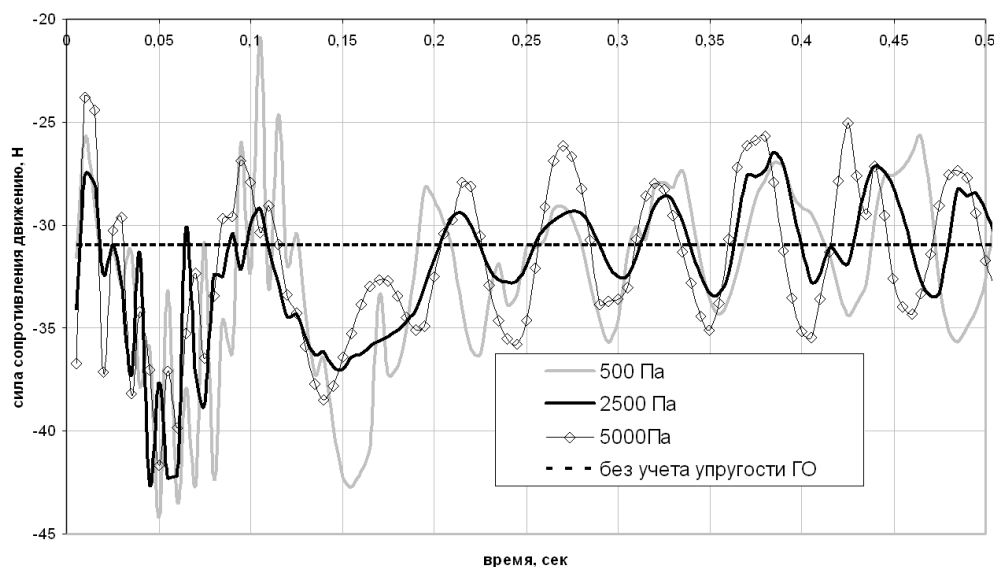


Рис. 7. Зависимости силы сопротивления на нижнем ярусе ГО от времени и различной начальной закачке баллонетов при движении СВП со скоростью 60 км/ч по водной поверхности

Заключение

Проведено моделирование аэрогидроупругого взаимодействия ГО баллонетного типа, применяемого на амфибийных СВП, с водными и воздушными потоками. Расчеты основываются на методике решения задач аэрогидроупругости, реализованной на базе программных комплексов ANSYS Mechanical и ANSYS-CFX [10]. Методика в целом позволяет решать пространственные нестационарные задачи аэрогидроупругости ГО амфибийных СВП как по моментной, так и по безмоментной теории оболочек с учетом нагрузок, действующих на ГО от воздушной подушки, аэродинамических нагрузок, возникающих при обтекании ГО внешним потоком, и нагрузок, действующих на глиссирующие элементы ГО.

Получены результаты для случая движения СВП по водной поверхности в отсутствие ветро-волновых возмущений в виде аэродинамических нагрузок, действующих на балло-

нет, изменения геометрической формы баллонета. Расчеты показывают, что даже при отсутствии ветро-волновых возмущений ГО баллонетного типа находится в автоколебательном режиме. Амплитуда и частота колебаний зависят, в том числе, от величины массы воздуха, закачанного в баллонет – начального статического избыточного давления в баллонете.

Дальнейшее развитие расчетов в направлении аэрогидроупругости ГО предполагает верификацию методики (прямую или косвенную) по результатам натурных испытаний СВП, учет в методике контактного взаимодействия баллонета с носовым и кормовым ГО, а также с твердыми опорными поверхностями с различными характеристиками рельефа и трения.

Список литературы

1. Демешко Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке. Кн. 2. СПб.: Судостроение, 1992. 329 с.
2. Бондарец К.В., Кличко В.В., Расчет парамет-

ров формы элементов гибких ограждений воздушной подушки // ЦНИИ им. А.Н. Крылова Труды, Гидродинамика быстроходных судов: Вып. 247. 1969. С. 66–78.

3. Паравян Э.А. Форма контура гибкого ограждения СВП, находящегося под воздействием произвольно направленных сосредоточенных сил. Вопросы судостроения. Серия Проектирование судов. Вып. 14 // ЦНИИ «РУМБ», 1977. С. 22–27.

4. Магула В.Э. Судовые эластичные конструкции. Л.: Судостроение, 1978. 263 с.

5. Hübner B., Seidel U., Roth S. Application of fluid-structure coupling to predict the dynamic behavior of turbine components // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 12-1. 2010.

6. Hübner B., Walhorn E., Dinkler D. A monolithic approach to fluid-structure interaction using space-time finite elements // Computer Methods in Applied

Mechanics and Engineering. 193, 200, P. 2087–2104.

7. Farhat C., Lesoinne M., Maman N., Mixed explicit/implicit time integration of coupled aeroelastic problems: Three-field formulation, geometric conservation and distributed solution // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 1995. 21. p. 807–835.

8. Le Tallec P., Mouro J. Fluid structure interaction with large structural displacements // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2001. 190. P. 3039–3068.

9. ANSYS Release 11.0 1996-2006 Documentation ANSYS Europe, Ltd.

10. Кальясов П.С., Туманин А.В., Якимов А.К., Шабаров В.В., Математическое моделирование аэрогидродинамики несущего комплекса амфибийных судов на воздушной подушке (СВП) баллонетного типа // Морской Вестник. №1(37). 2011. С. 104–107.

MODELING AERO-HYDROELASTIC INTERACTION OF A FLEXIBLE BALLONET BOARDING WITH WATER AND AIR FLOWS AS A PART OF THE CARRYING COMPLEX OF AN AMPHIBIAN HOVERCRAFT

L.A. Igumnov, A.V. Tumanin, P.S. Kalyasov, A.M. Kryzhanov

The aero-hydroelastic interaction of a flexible ballonet boarding of an amphibian hovercraft with water and air media is mathematically modeled. The results of numerically modeling the ballonet form and of the aero-hydrodynamic loading acting on the ballonet as a part of the carrying complex of an amphibian hovercraft are presented.

Keywords: aero-hydroelasticity, mathematical modeling, amphibian hovercraft, flexible boarding, aero-hydrodynamic loading.