

А.Г. ТАУБИН, К.А. РУМЯНЦЕВ

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ОБОЛОЧЕК ОБТЕКАТЕЛЕЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗОК ЛЕДОВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Рассмотрены существующие подходы к определению прочности и устойчивости оболочек, частично загруженных по своей поверхности. Выбраны наиболее эффективные методы расчета оболочек купольного типа на базе существующих численных процедур. Выполнены расчетные оценки, полученные результаты проанализированы. Установлены специфические эффекты, сопровождающие деформирование оболочек рассмотренного типа. Показано, что миграция очагов деформирования по поверхности оболочки и их прогрессирующая локализация являются признаками приближающейся потери устойчивости.

Ключевые слова: обтекатель, оболочка, лед, всплытие, прочность, устойчивость.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Таубин А.Г., Румянцев К.А. Прочность и устойчивость оболочек обтекателей при действии нагрузок ледового происхождения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Специальный выпуск 2: 69–75.

УДК 629.5.021.16

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-69-75

A.G. TAUBIN, K.A. RUMIANTSEV

Krylov State Research Centre, Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, Russia

STRENGTH AND STABILITY OF DOME SHELLS AT LOADS OF ICE ORIGIN

Contemporary ways of strength and buckling determination of partly loaded shells were considered. The most effective numeric methods were chosen for strength and stability evaluation of dome shaped shells. Series of calculations were performed and results were analyzed. Specific effects that accompany deformation were revealed. It is shown that the migration of deformation centers and its progressive localization are alarming signals of coming buckling.

Keywords: sonar dome, shell, ice, emersion, strength, buckling.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Taubin A.G., Rumiantsev K.A. Strength and stability of dome shells at loads of ice origin. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 69–75 (in Russian).

UDC 629.5.021.16

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-69-75

Введение

Современный тип обтекателя представляет собой оболочку вращения, изготавливаемую из композиционных материалов и не содержащую подкреплений в виде реберного набора [1]. Основными конструктивными признаками помимо используемых материалов являются размер и замкнутость или незамкнутость обтекателя в поперечном направлении.

Целью данной работы является определение видов опасных состояний, возникающих при действии экстремальных ледовых нагрузок на крупногабаритные замкнутые в поперечном направлении оболочки обтекателей, и изучение эффектов, сопровождающих деформирование таких конструкций.

На рис. 1 на примере атомной подводной лодки (ПЛ) типа «Вирджиния» показан типовой обтекатель гидроакустической станции (ГАС). Обтекатель выполнен из стеклопластика и имеет вид тела вращения купольного типа [1]. Рассматривая рис. 2, нетрудно предположить, что значительная нагрузка действует на верхние участки оболочек обтекателей в тех случаях, когда они являются замкнутыми куполами.

Нагрузки ледового происхождения

Экстремальные эксплуатационные нагрузки действуют на обтекатели ГАС ПЛ при всплытии корабля в умеренном по толщине сплошном ледовом поле и при выходе из мест базирования в зимний период





Рис. 1. Обтекатель подлодки перед монтажом



Рис. 2. Подлодка после всплытия в сплошном ледовом поле

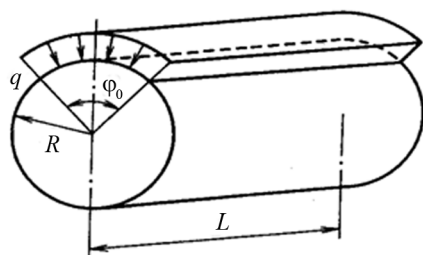


Рис. 3. Модель, использованная в работе [2]

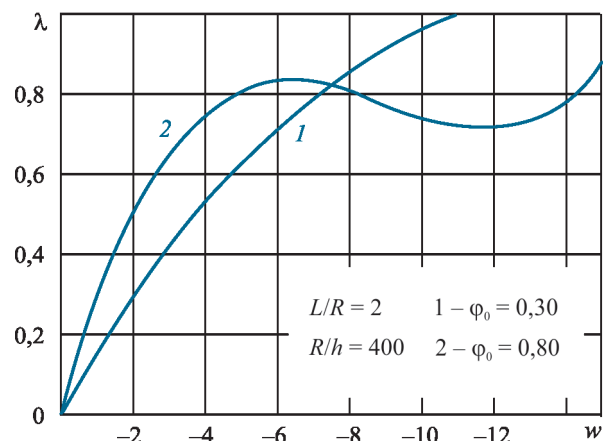


Рис. 4. Типовые диаграммы деформирования тонкостенных цилиндрических оболочек по [2]

в надводном положении в канале, заполненном битым льдом, вслед за ледоколом. Нагрузки ледового типа в обоих случаях действуют на относительно небольшие участки поверхности и в связи с этим являются локальными, вызывающими значительный изгиб оболочки, принципиально опасный для прочности конструкции, а также угрожающий ее устойчивости. Данное воздействие может считаться статическим. Таким образом, ситуация, связанная с всплытием в ледовом поле, сводится к определению реакции оболочки на статическое воздействие на части ее площади со стороны взламываемого льда. Методика определения нагрузок при всплытии в ледовом поле учитывает параметры льда, геометрию носовой оконечности и время года.

Подходы к решению проблемы

Существует обширная литература по расчетам прочности и устойчивости оболочек канонических типов для случаев, когда нагрузка занимает всю или почти всю их поверхность, например [9] и другие. Гораздо меньше работ, описывающих ситуацию, когда воздействию подвержены небольшие участки оболочек, например [2]. В указанной работе содержатся теоретическое рассмотрение случаев частичного нагружения по поверхности, стальных цилиндрических тонкостенных оболочек. Некоторые результаты расчетов из этого источника показаны на рис. 3 и 4.

На рис. 4 λ – параметр нагрузки, понимаемый как отношение действующей нагрузки к классической критической при равномерном внешнем давлении и при шарнирном закреплении торцов; w – отнесенный к толщине прогиб оболочки. На этом рисунке

иллюстрируется разница между двумя сценариями деформирования, которые могут затронуть любую оболочку при локальном нагружении. Кривая 1 имеет все признаки нелинейного деформирования, но не содержит предельную точку и отражает ситуацию непрерывного деформирования до исчерпания несущей способности. Кривая 2 содержит предельную точку и иллюстрирует возможность потери устойчивости в виде перехода в несмежное равновесное состояние.

При рассмотрении поведения оболочек обтекателей, которые принципиально отличаются по форме и типу обшивки от конструкций, рассмотренных в [2], ставилась задача выполнения оценки их прочности и устойчивости в указанном выше случае локального нагружения при всплытии в ледовом поле.

Методы расчета прочности и устойчивости при учете геометрической нелинейности

Контуры аналитического расчета устойчивости оболочек схематично изложены в [2]. Схема расчета зависит от того, ставится ли ограниченная задача установления наиболее низкого из значений теоретических критических нагрузок или целью является построение наиболее вероятной из возможных ветвей, по которой может происходить процесс деформирования, связанный с бифуркациями и переходами в смежные равновесные формы.

Общий подход к нахождению множества значений параметра нагрузки, соответствующих точкам бифуркации, заключается в выполнении следующих операций.

Рассматриваемой особой точке траектории нагружения соответствует состояние безразличного (нейтрального) равновесия, т.е. упругое тело при неизменной нагрузке допускает отклонение от исходного напряженно-деформированного состояния. Приращение перемещений не нарушает условий равновесия и уравнений внешних связей.

Вычитая почленно уравнения исходного состояния из уравнений возмущенного состояния, приходят к нелинейной однородной краевой задаче относительно приращений перемещений. Полученные соотношения являются уравнениями в вариациях, и нетривиальные решения этих уравнений связаны с особыми точками на исходной ветви решения. Собственные значения однородной системы уравнений определяют множество значений параметра нагруз-

ки $\lambda = \bar{\lambda}$. Эти значения на соответствующих траекториях деформирования определяют места, где происходит бифуркация исходного состояния.

Решение бифуркационной задачи при растущих значениях исходных перемещений и нагрузки позволяет ответить на вопрос однозначности решения в данной точке.

Процедура исследования картины ветвления для случая краевой задачи формулируется в следующем виде: $L(U, \lambda) = [L_i(U, \lambda)]$ – уравнения равновесия; $G(U, \lambda) = [G_i(U, \lambda)]$ – соотношения, описывающие граничные условия, где λ – параметр нагрузки (нагружение предполагается однопараметрическим); L_i – операторы левых частей разрешающих уравнений; G_i – операторы граничных условий на контуре оболочки Γ ; U – вектор неизвестных ($U = [u, v, w]$ при решении задачи в перемещениях).

Обозначим через X вектор-аргумент, через F – оператор левых частей алгебраизированной краевой задачи:

$$F(X, \lambda) = 0. \quad (1)$$

Пусть $X(\lambda^0)$ – исследуемое состояние. $F(X^0, \lambda^0) = 0$, а $\tilde{X}$ и $\tilde{\lambda}$ – вариации, сообщаемые решению и параметру нагрузки.

Если возмущенное состояние является равновесным, то $F(X^0 + \tilde{X}, \lambda^0 + \tilde{\lambda}) = 0$.

Далее используется разложение Тейлора для оператора F в окрестности исследуемого решения. Для сокращения вводят обозначение $\varphi \equiv F(X^0 + \tilde{X}, \lambda^0 + \tilde{\lambda}) = 0$. Опуская промежуточные преобразования, в [2] показано, что

$$\tilde{\varphi} \equiv -B\tilde{X} + A\tilde{\lambda} + N = 0, \quad (2)$$

где B – матрица Якоби системы уравнений (1); A – производная (1) по параметру нагрузки λ ; N – высшие члены разложения по вариациям X и λ .

При $\tilde{\lambda} \equiv 0$ векторное уравнение (2) переходит в уравнение нейтрального равновесия.

Уравнение (2) в любой точке имеет тривиальное решение при нулевых вариациях. В точке общего положения, т.е. в неособой точке, в окрестности точки $(0, 0)$ матрица B неособая и решение $(\tilde{X}, \tilde{\lambda})$ единственное. Это означает, что решение (X^0, λ^0) продолжается по параметру λ и ветвления нет.

В особой точке продолжение исходного решения неоднозначно, решение задачи (2) не единственное и, согласно теореме о неявной функции, матрица Якоби системы (2) вырождена:

$$\text{Det } B = 0, \text{ rang } B = r < n, \quad (3)$$

где n – порядок системы уравнений (2).



Таким образом, первоначальным шагом исследования картины ветвления является определение положения особой точки (X, λ) при выполнении условия (3).

Во многих случаях при решении практических задач ограничиваются этим шагом – фиксацией спектра собственных значений критических нагрузок. В ряде случаев стоит задача отыскания значений нижних критических нагрузок. Для построения ответвляющихся решений в [2] представлена дополнительная процедура, основанная на разработанном в [3] анализе матричных элементов разрешающих систем уравнений.

Представленная в [2] теория использована ее авторами для решения ряда задач, связанных с прочностью и устойчивостью стальных цилиндрических оболочек в различных условиях частичного нагружения по их поверхности. Помимо теоретических исследований авторами [2] приведены некоторые результаты расчетов цилиндрических оболочек (ЦО) на полосовые нагрузки. Уровни нагрузки в этой работе приводятся к значению классического критического значения в случае равномерного бокового внешнего давления и шарнирного опирания сторон. В работе справедливо отмечено, что критическая нагрузка существенно зависит от ширины зоны нагружения и соотношения углового размера полосы нагружения и размеров возникающих волн потери устойчивости ЦО, – это повышает или понижает величину критического давления. Не подвергая сомнению теорию, разработанную авторами [2], отметим, что при ее практической реализации, по-видимому, допущены неточности. Так, у авторов не получается предельный переход при $\phi_0 \rightarrow 2\pi$, т.е. когда нагрузка охватывает всю поверхность ЦО. В этом случае предел критической нагрузки в [2] равен 0,8 вместо единицы.

Разработанная выше теория использована в [2] для частично загруженных цилиндрических оболочек. Ее применение для обтекателей, имеющих более сложную форму, связано со значительными трудностями, но этот вопрос выходит за рамки настоящей статьи.

Помимо аналитического существует численный подход к решению данного вопроса. Он также имеет долгую историю [6]. Отличительной особенностью численного подхода является возможность учета сложной формы оболочки и произвольного закона ее нагружения. Возможен и учет нелинейных эффектов.

Для анализа устойчивости реализуются два подхода: на базе определения собственных значений

матрицы жесткости однородной алгебраической системы и на основе анализа траекторий нелинейного деформирования.

Для расчета деформирования с учетом геометрической и физической нелинейности по второму подходу разработаны две эффективные численные процедуры: метод Ньютона – Рафсона (НР) и метод Рикса – Крисфильда (РК), также называемый методом дуг или arc-length методом.

Метод НР [6, 7] варьирует параметр нагрузки $\Delta\lambda$ и позволяет добираться до предельных точек по траектории деформирования и даже рассчитывать перескок в смежную форму, но не позволяет строить ветви неустойчивого состояния. Метод наиболее эффективен при дополнительном введении энергетической стабилизации.

Метод РК (arc-length) [5, 8] – одновременная и согласованная вдоль вводимых дуг вариация перемещений Δu и параметра нагрузки $\Delta\lambda$. Аппроксимация нелинейного процесса приближается и проходит через предельные точки. Метод позволяет строить любые ветви, в том числе неравновесные.

Расчеты прочности и устойчивости обтекателей при всплытии подводной лодки в ледовом поле

Результаты расчета по методу НР типовой конструкции обтекателя при действии нагрузки от всплытия в ледовом поле показаны на рис. 5. Указанный метод был применен в рамках универсального программного комплекса ANSYS версии 17.0. Использованные элементы типа SHELL181 и SHELL281 обеспечивали учет основных соотношений геометрической нелинейности.

Форма прогиба, показанная на рис. 5а, соответствует начальной стадии деформирования. При расчете с учетом геометрической нелинейности процесса форма прогиба вначале меняется от картины, показанной на рис. 5а, до картины на рис. 5б с ростом очагового характера зоны максимальных прогибов. При этом очаг ощутимо сдвигается в сторону кормы. Таким образом, сдвиг зоны максимальных деформаций по мере роста нагрузки является первым установленным признаком приближающейся потери устойчивости. Вторым выявленным признаком является локализация прогибов в очаговой зоне перед потерей устойчивости. Это свидетельствует о значительном перестроении формы прогиба в докритическом состоянии. Как правило, на этой стадии нагружения в конструкции достигают опасных значений.

Процесс, в случае его дальнейшего развития, приводит к потере устойчивости обшивки, приведенной на рис. 5в, где перемещения показаны в натурную величину, и это иллюстрирует катастрофичность состояния оболочки обтекателя. Отметим, что признаки перестроения форм прогиба перед хлопками отмечаются и на цилиндрических оболочках, однако миграция очагов деформации вдоль конструкции и эффекты локализации прогибов не на них замечаются. Описанные эффекты присущи оболочкам вращения с искривленными формами меридиана, сходными с рассмотренными оболочками обтекателей.

Несмотря на сравнительно узкую зону, занимаемую нагрузкой, и изгибный характер напряженного состояния, имеем классический случай перехода в несмежную позицию равновесия, который часто фиксируется для полностью загруженных по поверхности оболочек. Особенностью процесса является формирование, смещение и первоначальное сужение очаговых зон до перехода в иное равновесное состояние. При этом оболочка проходит через стадию местной потери устойчивости (рис. 5б).

На рис. 6 показаны диаграммы деформирования характерной точки на поверхности обтекателя, которая отличается от остальных тем, что перед потерей устойчивости в ней находился центр очага перемещений. Ввиду того, что нагрузка при всплытии не имеет спада до достижения максимального значения, в качестве основного рабочего инструмента целесообразно применять метод НР с энергетической стабилизацией. Метод РК использован авторами данной статьи с целью оценки нижней критической нагрузки для рассчитываемой оболочки.

График на рис. 6 показывает, что характеристика нагружения оболочки при локализованной нагрузке – мягкая, т.е. сопротивление падает с ростом нагрузки. Это объясняется тем, что отношения между деформациями и перемещениями для оболочки при нелинейном подходе содержат произведения углов поворота поперечных сечений оболочки [9, 10]. Эти члены определяют нелинейный характер процесса деформирования. В работе [11] на базе соотношений [10] проведены соответствующие расчеты и сопоставления с опытами и показано, что именно квадраты углов поворота сечений, а также локальное изменение радиусов кривизны в очагах деформирования обеспечивают получаемую мягкую характеристику процесса нагружения. На этом рисунке также показано, что за счет применения процедуры метода РК может быть определено значение нижней крити-

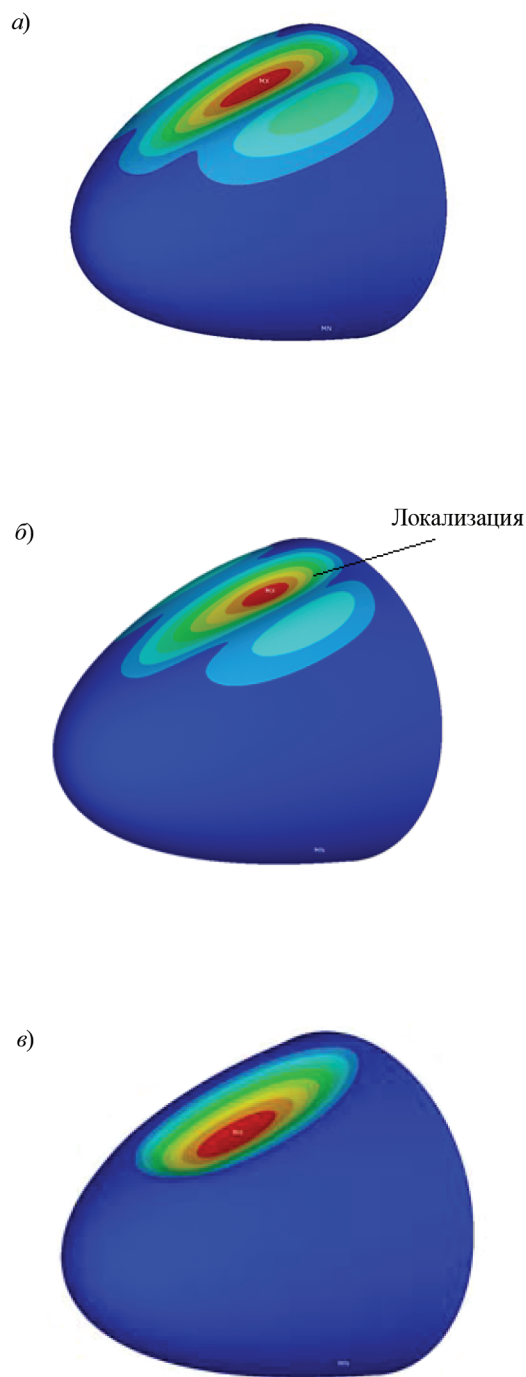


Рис. 5. Форма прогиба: а) на начальной стадии нагружения; б) перед потерей устойчивости; в) после потери устойчивости

ческой нагрузки, действующей на конструкцию, что необходимо для определения опасного состояния конструкции при данном виде нагружения.

Результаты рассмотрения позволяют утверждать, что склонность к потере устойчивости существует и при сравнительно узких полосах нагружения. Это означает, что расчет прочности в линейной постановке в таких случаях является недостаточным, т.к. может приводить к переоценке несущей способности оболочки. В реальности оболочка будет разрушена до реализации ситуации, показанной на рис. 5б.

Следует отметить, что вышеуказанные эффекты проявляются только при учете геометрической нелинейности модели и отсутствуют в линейной постановке. Таким образом, в случае линейного расчета несущая способность оболочки может быть переоценена.

Сопоставление зависимостей, построенных по методам НР и РК, позволяет установить следующее:

- значение критической нагрузки по обоим методам практически совпало;
- при всплытии в ледовом поле имеет место непрерывное возрастание нагрузки до максимального значения, поэтому кривая, построенная по методу НР, является более реалистичной;
- метод РК как в случае всплытия, так и при движении в битом льду позволяет оценить значение нижней критической нагрузки.

Выводы

1. Оболочки обтекателей имеют склонность к потере устойчивости при сравнительно узких полосах нагружения.
2. Расчет в линейной постановке является недостаточным, т.к. может приводить к переоценке несущей способности оболочки.
3. Перед потерей устойчивости возникают характерные эффекты: смещение максимумов перемещений и локализация прогибов оболочки.
4. При использовании численного подхода метод Ньютона – Рафсона с энергетической стабилизацией является эффективным средством описания процесса деформирования.
5. Для установления значений нижней критической нагрузки целесообразно использовать метод Рикса – Крисфильда или метод дуг (arc-length).
6. Допускаемые значения перемещений и напряжений должны соответствовать нагрузке ниже величины нижнего критического давления на площадку нагружения.

Усилие

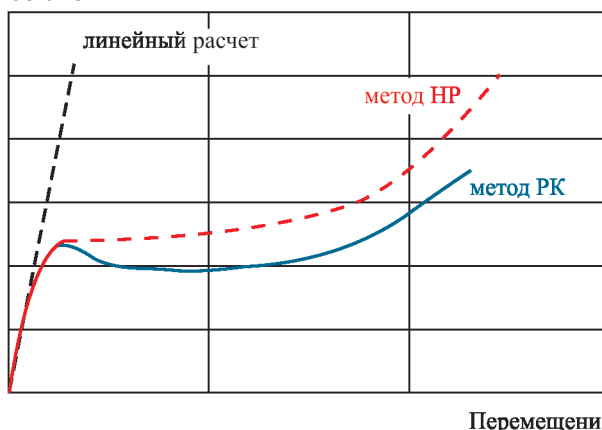


Рис. 6. Перемещение узла, находящегося в центре очаговой зоны

7. Таким образом, в результате данного исследования установлены опасные состояния оболочки при действии ледовой нагрузки, характеризующиеся локализацией максимальных прогибов и последующим перемещением этих максимумов по поверхности оболочки. Предложены способы выполнения соответствующих расчетных оценок прочности и устойчивости оболочек в данных условиях.

В расчетах следует учитывать толщину льда, габариты обтекателя, характеристики материала, распределение толщин оболочки и ее армирование. Конкретные конструктивные параметры обшивки устанавливаются в результате выполнения соответствующего расчета.

Библиографический список

1. Использование композитных конструкционных материалов при создании ПЛ. Аналитический обзор ОАО ЦКБМТ «Рубин». Янв. 2014. Вып. 18.
2. Андреев Л.В., Ободан Н.И., Лебедев А.Г. Устойчивость оболочек при неосесимметричных воздействиях. М.: Наука, 1988.
3. Ваинберг Д.В. и др. Особые точки и точки ветвления решений нелинейных уравнений деформируемой среды // Сопротивление материалов и теория сооружений (Республиканский межведомственный научно-технический сборник). 1973. Вып. 21. С. 24–31.
4. Riks E. An incremental approach to the solution of buckling and snapping problems // Int. J. Solids Struct. 1979. 15. P. 524–551.

5. *Vasios N.* Nonlinear analysis of structures. The Arc-Length method. Harvard, 2015.
6. *Басов К.А.* ANSYS. Справочник пользователя. М.: ДМК, 2011.
7. *Постнов В.А.* Численные методы расчета судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1977.
8. *Crisfeld M.A.* A fast incremental / iterative solution procedure that handles snap-through // *Computers and Structures*. 1983. 13. P. 55–62.
9. *Вольмир А.С.* Устойчивость упругих систем. М.: Наука, 1963.
10. *Постнов В.А., Слезина Н.Г.* Решение нелинейных задач устойчивости оболочек вращения с помощью метода конечных элементов // *Труды ЛКИ*. 1982. С. 66–73.
11. *Тaubин А.Г., Фрумен А.И.* Расчет неосесимметричных деформаций оболочек вращения с учетом геометрической нелинейности. Прочность судовых конструкций // *Труды МТУ*. 1994. С. 103–109.

Сведения об авторах

Тaubин Александр Георгиевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Телефон: +7 (812) 727-96-32. E-mail: alexgent@rambler.ru.

Румянцев Константин Андреевич, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Телефон: +7 (812) 727-96-32. E-mail: rum256@yandex.ru.

Поступила / Received: 07.03.18
Принята в печать / Accepted: 03.05.18
© Коллектив авторов, 2018

