

http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140603
 УДК 623.827
 Л 86

ASSESSMENT OF LIMITS OF OPTIMAL USE OF CYLINDRICAL AND MULTISPHERE PRESSURE HULLS IN THE ARCHITECTURE OF SUBMARINES

ОЦЕНКА ГРАНИЦ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И МНОГОСФЕРНЫХ ПРОЧНЫХ КОРПУСОВ В АРХИТЕКТУРЕ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

Andrii A. Lutsenko
andrii.lutsenko@nuos.edu.ua
 ORCID: 0000-0003-0937-5901

А. А. Луценко,
 асп.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The article considers the urgent problem of the selection of the optimal architectural and structural type of the submarines pressure hull. The aim of the study is to define the optimal limit of the use of the cylindrical and multisphere pressure hull in the construction of submarines. The analytical solution of this problem has been obtained by generating and solving the equations of masses and volumes with subsequent comparison of the results. The criterion of the comparison is the submerged displacement. The calculations are performed for the steel and titanium pressure hulls within the depth range of 500...3000 m. The initial model corresponds to the 685 submarine «Komsomolets» (according to the NATO classification «Mike»). According to the calculations results, the limit of the optimal use of the multisphere pressure hulls lies within the studied range of the submergence depth. The defined limits of the optimal use of the pressure hulls of various types can be used in solving design problems and scientific problems.

Keywords: architectural and structural type; shape of the pressure hull; submarine; weight load; strength of the pressure hull; Norman coefficient; submergence depth.

Аннотация. Выполнен сравнительный анализ преимуществ и недостатков применения цилиндрического и многосферного прочных корпусов в конструкции современных подводных лодок. Приведена оценка границ оптимального применения прочных корпусов указанных типов.

Ключевые слова: архитектурно-конструктивный тип; форма прочного корпуса; подводная лодка; весовая нагрузка; плотность прочного корпуса; коэффициент Норманна; глубина погружения.

Анотація. Виконано порівняльний аналіз переваг та недоліків застосування циліндричного та багатосферного міцних корпусів у конструкції сучасних підводних човнів. Зроблено оцінку меж оптимального застосування міцних корпусів указаних типів.

Ключові слова: архітектурно-конструктивний тип; форма міцного корпусу; підводний човен; вагове навантаження; щільність міцного корпусу; коефіцієнт Нормана; робоча глибина занурення.

REFERENCES

- [1] Bukalov V.M., Narusbaev A.A. *Proektirovanie atomnykh podvodnykh lodok* [Nuclear submarines design]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1968. 332 p.
- [2] Kormilitsin Yu.N., Khalizev O.A. *Proektirovanie podvodnykh lodok* [Submarine vessels design]. Saint Petersburg, SPbGMTU Publ., 2004. 344 p.
- [3] Pavlov A.S. *Voennyye korabli SSSR i Rossii 1945–1995 g* [War ships of the USSR and Russia in 1945–1995]. Yakutsk, Sakhapoligrafizdat Publ., 1995. 211 p.
- [4] Aleksandrov V.L., Glzman M.K., Rostovtsev D.M., Sivers N.L. *Proektirovanie konstruytsiy osnovnogo korpyasa PA* [Design of the submarine pressure hull construction]. Saint Petersburg, SPbSMTU Publ., 1994. 435 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время на мировом рынке подводной техники двойного назначения динамично развивается спрос на подводные аппараты и подводные лодки (ПЛ). В связи с этим научные исследования и проектные проработки в области военно-морской подводной техники можно считать весьма перспективными. Новые проекты предлагаемых на рынке неатомных подводных лодок ведущих мировых фирм Kockums, IKL, DCNS, HDW обладают воздухонезависимыми энергетическими установками, модульным принципом размещения оборудования и систем, нетрадиционной геометрией внешнего корпуса, размещением вооружения во внешних контейнерах вне основного прочного корпуса, что свидетельствует о пересмотре традиционных взглядов на тактику применения, конструкцию и архитектуру ПЛ.

В открытых источниках информации по проектированию подводных лодок [1, 2] вопрос выбора рациональной формы прочного корпуса освещен недостаточно и ограничивается рассмотрением цилиндрических прочных корпусов (ПК). В то же время, в 2003 году, в состав флота РФ вошла атомная глубоководная станция (АГС) 1 ранга АС-12 пр.10831 (классификация НАТО *NORSUB-5*), имеющая, по некоторым данным (<http://militaryrussia.ru>), многосферный прочный корпус. Глубина погружения станции превышает 3000 м. Многосферной формой прочного корпуса обладает спасательный подводный аппарат ВМС США DSRV. Изложенное позволяет считать перспективным исследование вопросов оптимального применения прочных корпусов различных форм в архитектуре подводных лодок.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В связи с большой насыщенностью высокими оборонными технологиями открытых научных публикаций по теме выбора и обоснования архитектурных концепций глубоководных подводных лодок не так много. В источнике [2] рассматриваются лишь цилиндрические прочные корпуса, а в [1] приводятся рекомендации американских специалистов для рабочих глубин погружения до 1200 м применять классический цилиндрический прочный корпус. В работе [4] освещаются методики выбора и расчета многосферных прочных корпусов для обитаемых подводных аппаратов, но отсутствуют какие-либо рекомендации по выбору оптимальной формы прочного корпуса для ПЛ.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – численное определение границ рационального применения цилиндрического и многосферного прочных корпусов в конструкциях современных подводных лодок; оценка влияния перехода с цилиндрической на

многосферную форму прочного корпуса на коэффициент Нормана, а также на выбор оптимального предела текучести применяемого материала корпуса.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для численного определения границ оптимального применения цилиндрического или многосферного ПК (перед постановкой задачи поиска границ оптимальных областей) рассмотрим явные преимущества и недостатки, проистекающие из различия несущей способности, геометрии, технологичности, удобства компоновки внутреннего и наружного оборудования, «вписываемости» в удобообтекаемые приемлемые обводы наружного корпуса (НК).

Цилиндрический прочный корпус

Преимущества: освоенность расчетных схем и отработанная технология изготовления, удобное размещение оборудования в процессе удифферентовки проекта, отличная «вписываемость» в удобообтекаемые обводы НК, позволяющая в пределах реализовать однокорпусную схему, и, как следствие, меньшее полное подводное водоизмещение при малых расчетных глубинах.

Недостатки: большая толщина обшивки и, как следствие, масса (при одинаковых с многосферным корпусом расчетной глубине погружения, диаметре и материале), большой объем сварочных работ (при наличии набора), потеря внутреннего полезного объема при внутреннем размещении набора.

Многосферный прочный корпус

Преимущества: меньшие масса и толщина обшивки, возможность размещения в междуортном пространстве оборудования, систем, устройств и вооружения без существенного увеличения диаметра наружного корпуса, отсутствие (как правило) несущего набора и связанных с этим потерь внутреннего полезного пространства, меньшие диаметр и масса прочных поперечных переборок.

Недостатки: худшая технологичность, связанная с большей сложностью гибочных и сборочных работ, сложность размещения крупногабаритных внутренних элементов силовой энергетической установки (СЭУ), вооружения и их перемещения в процессе проектной удифферентовки, сложность обеспечения обитаемости и эргономичности внутренних объемов, большая чувствительность к отклонениям геометрии, что отражается на несущей способности в большей степени, чем у цилиндрического ПК (при $f = 0,25$ у цилиндра $\eta_1 = 0,7$, у сферы $\eta_1 = 0,453$ [4]), большая протяженность трасс гидравлики, электропитания, воздуха высокого давления (ВВД).

При рабочих глубинах до 500 м приоритет остается за цилиндрической формой ПК. С ростом расчетной глубины увеличивается доля массы ПК и ПЛ с традиционным цилиндрическим ПК начинает терять свойства платформы-носителя в связи с общим

ростом водоизмещения, габаритных размеров и стоимости.

Построение адекватной модели нагрузки выполнено путем пересчета глубоководной ПЛ пр. 685 «Плавник», известной под названием «Комсомолец» [3] (табл. 1, 2).

Таблица 1. Тактико-техническая характеристика пр. 685 (атомная глубоководная большая торпедная ПЛ)

Характеристика	Символ	Величина	Единица измерения	Примечание
Водоизмещение:				
надводное	D_n	5880	т	
полное подводное	$D_{\text{пл}}$	8500	т	
Главные размерения:				
длина	L	117,5	м	
ширина	B	8,0	м	
высота	H	10,7	м	
Глубина погружения:				
рабочая	H_p	1000	м	
предельная	$H_{\text{пр}}$	1250	м	
Скорость хода:				
надводная	v_n	14	уз	
полная подводная	$v_{\text{п}}$	30,5	уз	
Вооружение				
число ТА × калибр	$n_{\text{ТА}}$	6×533	ед.	Носовые ТА
боезапас		28	ед.	
Экипаж	$N_{\text{эк}}$	64	чел.	

Таблица 2. Результаты расчета укрупненных статей нагрузки пр. 685

Номер	Статья нагрузки	Масса, т	Объем в ПК, м ³
1	Прочный корпус с подкреплениями	1831,5	5156
2	Фундаменты, крепления	252	–
3	Поперечные переборки	120	–
4	Платформы и выгородки	60,5	–
5	Наружный корпус	647	–
6	ВЭУ (СКАБ, АДГ, дизельное топливо)	303	300
7	АЭУ	1390	1488
8	Электрорадиооборудование и электроника	235	511
9	Судовые системы	323	767
10	Судовые устройства	100	100
11	Балласт и цистерны внутри ПК	200	200
12	Экипаж, запасы, оборудование помещений, РЭВ, вооружение, ГАК, жилые помещения-invar	418	1790

Отличительной особенностью проекта 685 является большой запас плавучести – 36 %, что, вероятно, связано с желанием проектантов обеспечить возможность аварийного всплытия с использованием автономных твердотопливных газогенераторов, а также получить приемлемые гидродинамические характеристики. Следует заметить, что полученный измеритель массы наружного корпуса $q_{\text{ПК}} = 1,98 \text{ т/м}^2$ превышает среднестатистический [2].

Предварительная проработка общего расположения ПЛ семейства «Амур» в многосферном ПК показала, что требуемый объем многосферного ПК по сравнению с цилиндрическим должен быть примерно

на 25 % больше. Кроме того, расчеты показывают, что многосферный ПК имеет недостаток в отношении удельной площади палуб и платформ по сравнению с цилиндрическим вариантом. Отношение $S/V_{\text{ПК}}$, м²/м³ составляет при одной палубе ~ 0,1 м²/м³, при двух палубах ~ 0,2 м²/м³, цилиндрические корпуса имеют $S/V_{\text{ПК}} \approx 0,4 \text{ м}^2/\text{м}^3$ [2].

Прорисовка многосферного ПК в дирижабельных удобообтекаемых обводах «Кокс» и «НЕЖ» дает значение $K_{\text{з.л.к}} = 0,64$ (с цилиндрической вставкой протяженностью 60 % $K_{\text{з.л.к}} = 0,66$), что вполне удовлетворительно, так как мода $K_{\text{з.л.к}}$ у ПЛ с цилиндрическими ПК составляет примерно 0,69.

С целью обеспечения расчета массы прочного корпуса цилиндрической и сферической формы в диапазоне рабочих глубин 500...3000 м выполнен расчет условной плотности титанового с $\sigma_T = 750$ МПа и стального с $\sigma_T = 1250$ МПа ПК (табл. 3), результаты расчетов аппроксимированы.

При расчете условной плотности ПК принято: относительное отклонение от круговой формы $f = 0,25$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; плотность стали $\rho = 7850$ кг/м³; титана $\rho = 4500$ кг/м³; расчетная глубина $H_p = 1,5H_{раб}$, м; допускаемое напряжение на расчетной глубине $[\sigma] = 0,8\sigma_T$; предельная шпация цилиндрического ПК выбрана из условия обеспечения оптимального соотношения прочности и устойчивости, т. е. при $\lambda = 1,11$ [1]. Запас по устойчивости на рабочей глубине $K_y = 1,5$. Запас на коррозионный износ принят равным нулю.

При расчете массы многосферного ПК использована расчетная модель полной сферы, т. е. предполагается, что потерянная площадь сечений сферических сегментов в местах пересечения сфер перераспределена в зону краевого эффекта [4].

Таблица 3. Условная плотность прочных корпусов

Форма	Материал	σ_p , МПа	Расчетная зависимость, т/м ²
Сфера	Титан	750	$\rho \approx 0,0158P_p + 0,0809$
	Сталь	1250	$\rho \approx 0,0171P_p + 0,1241$
Цилиндр	Титан	750	$\rho \approx 0,0231P_p + 0,0933$
	Сталь	1250	$\rho \approx 0,0236P_p + 0,1678$

Примечание: P_p – рабочее давление, МПа. Значения σ_T приняты по данным открытых публикаций о достижениях ЦНИИ «Прометей», Россия (www.prometey.nw.ru).

Условия расчета сравнительных вариантов проектов: масса прочного корпуса $M_{ПК} = M_{ПКч} \cdot 1,1$, где 1,1 – коэффициент учета местных подкреплений; постоянный плавучий объем $V_{п.п.о} = 1,112 \cdot V_{ПК}$ м³, где $K_{п.п.о} = 1,112$ – коэффициент ППО; $V_{ПК}$ – внутренний объем прочного корпуса; $M_{ПКч}$ – «чистая» масса ПК. Запас плавучести принят равным 36 % от $V_{нальв}$. Коэффициент заполнения легкого корпуса $K_{з.л.к} = 0,69$ – для ПЛ с цилиндрическим ПК, $K_{з.л.к} = 0,65$ – для ПЛ с многосферным ПК. Показатель ходкости – адмиралтейский коэффициент $C_{адм} = 374,7$ для всех вариантов.

Измерители массы прочных поперечных переборок (при расчетном давлении $P_{расч} = 4$ МПа): цилиндрического ПК $q = 0,8$ т/м² (титан); многосферного ПК $q = 0,6$ т/м² (титан).

Измеритель массы палуб $q_{п} = 30$ кг/м² (титан).

При расчете нагрузки стальных вариантов в связи с разной удельной прочностью стали и титанового сплава принято: измеритель массы систем увеличи-

вается на 13 %, общесудовых устройств – на 28 %, наружного корпуса – на 5 %, фундаментов, платформ, переборок – на 5 %.

При одинаковой вместимости многосферный прочный корпус получается по объему на 25 % больше цилиндрического. Поэтому сравнение вариантов целесообразно производить с той расчетной глубины (ожидаемая верхняя граница перехода), когда объем цилиндрического прочного корпуса назначен на 25 % больше, чем требуется исходя из условия размещения оборудования. Критериями сравнения вариантов служат полное подводное водоизмещение и достижимая скорость хода (при одинаковой полезной нагрузке, материале ПК, мощности СЭУ).

При указанных выше коэффициентах $K_{з.л.к}$ равенство полного подводного водоизмещения и скорости хода вариантов наступит при

$$V_{ПК}^{II} = \left(\frac{K_{з.л.к}^{II}}{K_{з.л.к}^M} \right) \times 1,25V_{тр} = 1,326V_{тр},$$

где $V_{тр}$ – требуемый объем цилиндрического ПК по условию размещения оборудования.

Расчет вариантов проектов выполнен путем решения уравнений масс и объемов с последующим балансом по Архимеду. Результаты расчетов нагрузки сведены в табл. 4.

В таблице группа I – массы и объемы, линейно зависящие от водоизмещения, группа II – массы и объемы, зависящие в степени 0,667, группа III – инварианты, заданные величины.

Уравнения весов и объемов:

$$\text{вариант А} - 0,383D_{н} - 3,008D_{н}^{0,667} - 2111 = 0;$$

$$0,566V_{ПК} - 2,041V_{ПК}^{0,667} - 3578 = 0;$$

$$\text{вариант В} - 0,407D_{н} - 3,086D_{н}^{0,667} - 2111 = 0;$$

$$0,7462V_{ПК} - 2,551V_{ПК}^{0,667} - 4472 = 0;$$

$$\text{вариант С} - 0,394D_{н} - 3,19D_{н}^{0,667} - 2111 = 0;$$

$$0,566V_{ПК} - 2,041V_{ПК}^{0,667} - 3578 = 0;$$

$$\text{вариант D} - 0,416D_{н} - 3,274D_{н}^{0,667} - 2111 = 0;$$

$$0,7462V_{ПК} - 2,551V_{ПК}^{0,667} - 4472 = 0.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 5, 6.

Варьирование пределов текучести высокопрочных сталей и титановых сплавов при известной условной плотности прочного корпуса (при неизменной нагрузке вариантов) позволило построить график зависимости граничной глубины перехода в функции от предела текучести применяемого материала, приведенный на рис. 1.

Таблица 4. Весовая нагрузка расчетных вариантов

Группа	Статья нагрузки	Вариант А Титановый цилиндрикоконический ПК		Вариант В Титановый многосферный ПК		Вариант С Стальной цилиндрикоконический ПК		Вариант D Стальной многосферный ПК	
		Масса, т	Объем в ПК, м ³	Масса, т	Объем в ПК, м ³	Масса, т	Объем в ПК, м ³	Масса, т	Объем в ПК, м ³
I	Прочный корпус	3981	7730	3653	7281	3807	7730	3491	7281
	Свободный объем в ПК	–	1902	–	141	–	1902	–	141
	Фундаменты, переборки, платформы	648	–	527	–	680	–	553	–
	Судовые системы	484	1150	456	1354	547	1150	515	1354
II	Балласт и цистерны внутри ПК	300	300	283	353	300	300	283	353
	Наружный корпус	847	–	847	–	889	–	889	–
	Судовые устройства	131	131	126	157	168	131	161	157
	Электрооборудование	308	669	296	804	308	669	296	804
III	Энергоустановка	1693	1788	1693	2235	1693	1788	1693	2235
	Вооружение, оборудование помещений, экипаж, запасы	418	1790	418	2237	418	1790	418	2237
	Σ	8810	7730	8299	7281	8810	7730	8299	7281

Таблица 5. Результаты расчета тактико-технических характеристик вариантов

Показатели	Базовый проект пр. 685	Вариант А		Вариант В		Вариант С		Вариант D	
		Цилиндрикоконический	Титан, $\sigma_T = 750$ МПа	Цилиндрикоконический	Титан, $\sigma_T = 500$ МПа	Цилиндрикоконический	Сталь, $\sigma_T = 12,50$ МПа	Цилиндрикоконический	Сталь, $\sigma_T = 700$ МПа
Тип прочного корпуса	Цилиндрикоконический	Цилиндрикоконический	Титан, $\sigma_T = 750$ МПа	Цилиндрикоконический	Титан, $\sigma_T = 500$ МПа	Цилиндрикоконический	Сталь, $\sigma_T = 12,50$ МПа	Цилиндрикоконический	Сталь, $\sigma_T = 700$ МПа
Рабочая глубина погружения, м	1000	1620	1620	1620	1620	1200	1200	1200	1200
Водоизмещение, т: полное подводное подводное надводное	8500 7997 5880	12768 11982 8810	12768 11982 8810	12768 11286 8299	12768 11286 8299	12768 11982 8810	12768 11982 8810	12768 11286 8299	12768 11286 8299
Скорость хода, уз	30,5	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8

Таблица 6. Сравнительные показатели вариантов проекта

Показатели	Базовый проект пр. 685	Вариант А	Вариант В	Вариант С	Вариант D
Тип прочного корпуса	Цилиндро-конический	Цилиндро-конический	Многосферный	Цилиндро-конический	Многосферный
$K_{нд}$	2,41	3,47	3,28	4,44	3,25
$K_{нл}$	1,363	2,0	1,52	2,0	1,52
Доля массы корпусных конструкций в водоизмещении, %	49,5	62	60	61	60
Объем ПК для размещения оборудования, %	100	132,6	102	132,6	102
Плотность ПК, т/м ³	0,355	0,515	0,502	0,492	0,477

Примечание: при расчете коэффициентов Нормана инвариантами приняты вооружение, жилые помещения личного состава с оборудованием, личный состав и запасы, энергоустановка.

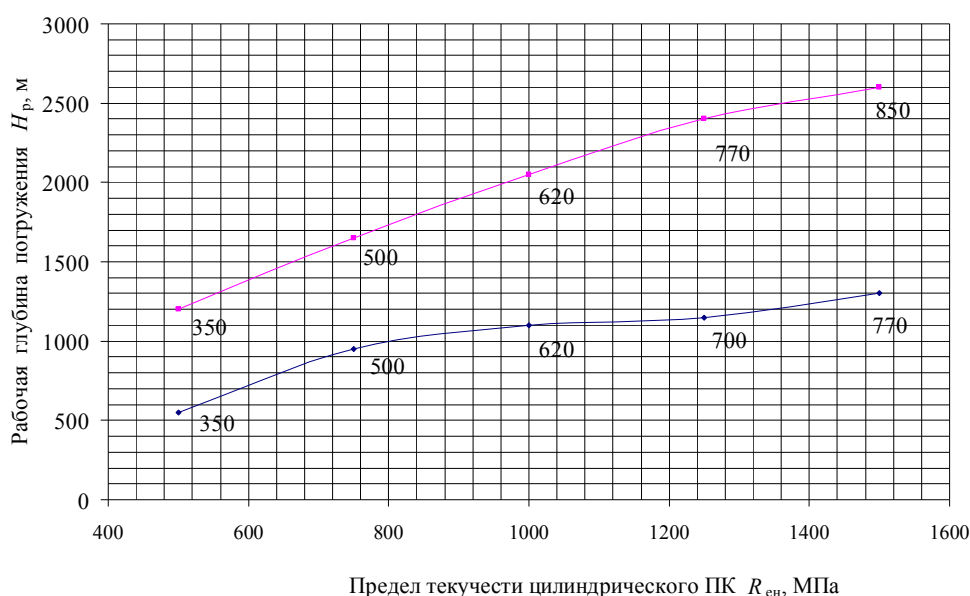


Рис. 1. Границы рационального применения цилиндрического и многосферного архитектурно-конструктивных типов ПК: —■—, —■— — рабочая глубина оптимального перехода, сталь, титановые сплавы соответственно (на граничных кривых нанесены оптимальные значения предела текучести материала многосферного прочного корпуса)

ВЫВОДЫ

В результате расчетов установлено:

1. Многосферный прочный корпус целесообразно применять при использовании стали с $\sigma_T = 1250$ МПа при рабочей глубине более 1200 м; при использовании титанового сплава с $\sigma_T = 750$ МПа при рабочей глубинах более 1600 м, так как при больших глубинах водоизмещение ПЛ с многосферным ПК ниже водоизмещения варианта с цилиндрическим ПК.

2. При переходе на многосферный ПК глубже найденных границ можно использовать материал

с более низким (на 30...40 %) пределом текучести.

3. Выполненные вариантные расчеты позволяют также полагать, что граничная глубина перехода чувствительна к поставленным условиям задачи — $K_{з.л.к}$ проекта, $K_{п.л.о}$, т. е. к доле водоизмещающих объемов вне ПК, доле массы ЭУ в общем балансе нагрузки, а также к принятому коэффициенту утилизации внутреннего объема ПК.

4. Коэффициенты Нормана вариантов с многосферным ПК имеют более низкие значения, чем у вариантов с цилиндрическим ПК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Букалов, В. М. Проектирование атомных подводных лодок [Текст] / В. М. Букалов, А. А. Нарусбаев. — Л. : Судостроение, 1968. — 332 с.
- [2] Кормилицин, Ю. Н. Проектирование подводных лодок [Текст] / Ю. Н. Кормилицин, О. А. Хализев. — СПб. : СПбГМТУ, 2004. — 344 с.

- [3] **Павлов, А. С.** Военные корабли СССР и России 1945–1995 гг. [Текст] : справочник / А. С. Павлов. – Якутск : Сахаполиграфиздат, 1995. – 211 с.
- [4] Проектирование конструкций основного корпуса ПА [Текст] / В. Л. Александров, М. К. Глозман, Д. М. Ростовцев, Н. Л. Сиверс. – СПб. : СПбГМТУ, 1994. – 435 с.

© А. А. Луценко

Надійшла до редколегії 11.09.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *В. О. Нєкрасов*