

Таблица 1

Технологические показатели по экспериментальному ручью № 6 и сравнительному ручью № 5 МНЛЗ № 2 Енакиевского металлургического завода

Номер ручья	Давление рабочей жидкости, подаваемой в гидроцилиндр механизма прижатия рабочих роликов тянущее-правильного устройства, МПа	Количество разлитых плавок, шт	Средняя скорость разливки, м/мин	Средняя температура заготовки перед тянущее-правильным устройством, °С
6	2,5	1128	2,98	1104
5	1,6	1115	2,93	1096

Таблица 2

Качественные показатели непрерывнолитых заготовок по экспериментальному ручью № 6 и сравнительному ручью № 5 МНЛЗ № 2 Енакиевского металлургического завода

Номер ручья	Средние размеры сторон квадрата НЛЗ, мм (высота и ширина)*	Средний балл осевой пористости	Средняя величина усадочной раковины, мм	Средний балл осевых трещин
6	148,5 × 151,0	0	0,5	0,5
5	150,0 × 150,0	2,0	2,5	0,5

* – в соответствии с требованиями к непрерывно-литой квадратной заготовке ТУ У-27.1-00191193-023-2001 с изменением № 1, разность сторон для НЛЗ сечением 150 × 150 мм не должна превышать 3,5 мм.

После подготовки отчета о проделанной работе, начиная с 30 марта 2011 года, на МНЛЗ № 2 по всем ру-

чьям установили повышенное прижатие валков ТПМ с целью обжата непрерывнолитой заготовки и устранения дефектов усадочного происхождения в осевой зоне заготовок.

Выводы

В целом, результаты выполненных экспериментальных исследований свидетельствуют о достаточной степени эффективности применения процесса «мягкого» обжата непрерывнолитых сортовых заготовок, что необходимо учитывать при создании нового, а также совершенствовании действующего оборудования машин непрерывной разливки.

Литература

1. Мазур В. Л. Анализ тенденций развития горно-металлургического комплекса Украины [Текст] / В. Л. Мазур, А. К. Голубченко // Сталь. – 2007. – № 4. – С. 83–93.
2. Минаев А. А. Совмещенные металлургические процессы: монография [Текст] / А. А. Минаев. – Донецк: Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ, 2008. – 552 с.
3. Смирнов Е. Н. Развитие научных основ повышения качества сортового проката из непрерывнолитой стали и совершенствование технологии производства; 05.03.05 [Текст] / Смирнов Евгений Николаевич. – Донецк, 2009. – 577 с.
4. Система технологического проектирования метода «мягкого» обжата непрерывнолитых блюмов и заготовок в конце затвердевания [Текст] / А. А. Минаев, Е. Н. Смирнов, А. Н. Смирнов [и др.]. // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. – Луганськ: вид-во СНУ ім. Даля, 2002. – С. 59–66.

УДК 629.5.01:629.584

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ БЛОКОВ ПЛАВУЧЕСТИ ИЗ ПЕНОСТЕКЛА ДЛЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Н. С. Соломонюк
Ассистент

Кафедра проектирования и изготовления конструкций из композиционных материалов
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
пр. Героев Сталинграда, 9г, г. Николаев, Украина, 540
Контактные тел.: (0512) 47-64-15, 095-288-30-25
E-mail: nata_solo@ukr.net

Побудована математична модель руйнування блока плавучості на основі піноскла для підводних апаратів при гідростатичному стисканні. Доведена її працездатність порівнянням з експериментальними даними пошкоджувальності піноскла.

Ключові слова: пошкоджувальність, плавучість, піноскло, гідростатичний тиск.

Построена математическая модель разрушения блоков плавучести из пеностекла для подводных аппаратов при гидростатическом сжатии. Доказана ее работоспособность сравнением с экспериментальными данными повреждаемости пеностекла.

Ключевые слова: повреждаемость, плавучесть, пеностекло, гидростатическое давление.

The mathematic model of buoyancy blocks' destruction of the foam-glass attached for the submarine to hydrostatic pressure is built. Its capacity is proved by comparison with experimental data of foamglass failure.

Keywords: failure, buoyancy, foamglass, hydrostatic pressure.

1. Введение

Исследование относится к области подводной техники, проектирования и конструирования подводных аппаратов. В настоящее время широко начали исследоваться области океанического дна с повышенной температурой. Например, зоны тектонических разломов (температура до 400 °С), где обнаружены особые формы жизни и большое количество полезных ископаемых. Для использования подводных технических средств в таких условиях необходимо защитить аппаратуру и людей от повышенных температур. Поэтому блоки плавучести, которыми обшивается прочный корпус аппарата, должны выдерживать высокие температуры для обеспечения нейтральной плавучести подводного аппарата длительное время.

2. Постановка проблемы

Блок плавучести, изготовленный из пеностекла с закрытоячеистой структурой, перспективен при повышенной и нормальной температурах воды. Он обладает высокой термостойкостью (до 400 °С). Знание механизмов и объемов повреждаемости блоков плавучести из пеностекла при гидростатическом сжатии важно при проектировании подводного аппарата и в процессе его эксплуатации для контроля изменения его подъемной силы.

3. Анализ исследований и публикаций.

До настоящего времени блоки плавучести из пеностекла не применялись. Само пеностекло широко используется в строительстве в качестве тепло- и звукоизоляции [1]. В работе [2] говорится о возможности применении блоков из пеностекла для спасательных приспособлений и понтонных мостов.

Для блоков плавучести из пеностекла свойственно при погружении накапливать повреждения, проламывая поры в наиболее слабых местах, в отличие от широко используемых блоков из сферопластика, у которых есть граница прочности при гидростатическом сжатии [3]. То есть при определенном давлении происходит мгновенная потеря прочности с разрушением всего блока плавучести при этом небольшое количества влаги накапливается в поверхностных слоях [4]. Несомненно, в строительстве плотность пеностекла и его открытая пористость влияют на конструкционные свойства блока плавучести, но не в той мере как в условиях гидростатического сжатия.

4. Цель статьи

Построение математической модели накопления повреждений в блоке плавучести из пеностекла. Определение наличия и характера связи между плотностью и параметрами пор в блоке.

5. Основное содержание

Проводится анализ накопления повреждений в блоке плавучести из пеностекла при гидростатическом обжатии. За основу расчетной модели элементарной ячейки принимается додекаэдр (рис. 1,а), так как этот многогранник наиболее вероятен при вспенивании полимерных [5] и неорганических материалов, в частности при вспенивании стекла [6]. Грани додекаэдра имеют форму практически равномерных по толщине пятигранных пластинок, так как при исследуемых плотностях пеностекла (0,3...0,7 г/см³) внутренняя полость ячейки превращается из сферической в многогранную. Пятигранные пластинки граней ячейки (рис. 1,б) можно представить круглыми с эквивалентной площадью, защемленными по контуру, нагруженные равномерным давлением (рис. 1,в).

Согласно [7], напряжения в круглой пластине, нагруженной равномерно распределенной изгибающей нагрузкой (р), равны

$$\begin{cases} \sigma_r(r) = \frac{3p}{8h^2} (r^2(3+\nu) - R_{\text{экв}}^2(1+\nu)) \left(1 + 3,33 \left(\frac{h}{R_{\text{экв}}} \right)^2 \right), \\ \sigma_\theta(r) = \frac{3p}{8h^2} (r^2(1+3\nu) - R_{\text{экв}}^2(1+\nu)) \left(1 + 3,33 \left(\frac{h}{R_{\text{экв}}} \right)^2 \right), \end{cases} \quad (1)$$

где h — толщина пластины в ее центре, R_{экв} — эквивалентный радиус круглой пластины, r — текущий радиус круглой пластины, ν — коэффициент Пуассона материала.

Напряженное состояние элемента круглой пластины показано на рис. 2. Так как напряженное состояние пластинки — осесимметричное, нормальные напряжения не зависят от угла наклона плоскости θ, и зависят только от текущего радиуса r. Максимальные напряжения оказываются в центре пластинки при r = 0, поэтому после преобразования (1) можно их получить в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{max}} &= \sigma_\theta(0) = \sigma_r(0) = \\ &= \frac{3pR_{\text{экв}}^2(1+\nu)}{8h^2} \left(1 + 3,33 \left(\frac{h}{R_{\text{экв}}} \right)^2 \right). \end{aligned} \quad (2)$$

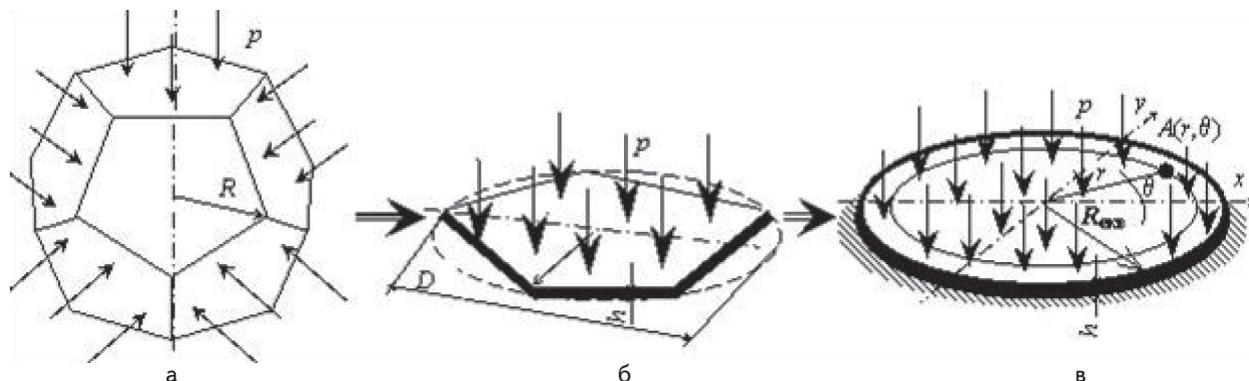


Рис. 1. Схематическое представление напряженного состояния ячейки (а) пеностекла в блоке плавучести и ее грани (б, в)

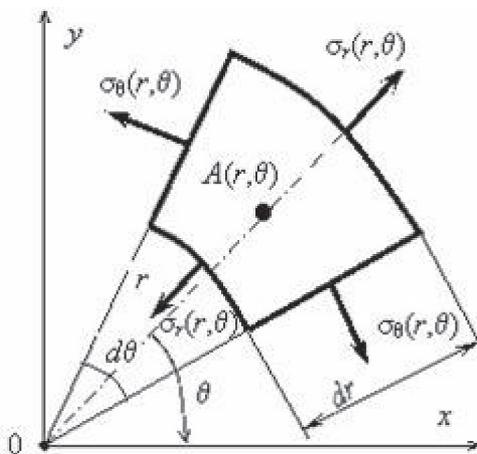


Рис. 2. Напряженное состояние бесконечно малого элемента круглой пластины, нагруженной равномерным давлением

Радиус грани додекаэдра зависит от диаметра ячейки d

$$R_{\text{экв}} = 0,3325d. \quad (3)$$

Затем эквивалентный радиус пластинки $R_{\text{экв}}$ выражается через толщину стенки грани в центре h и диаметр ячейки d . Максимальные напряжения в центре пластинки из (2) с применением (3) будут иметь вид

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{0,0414p(1+\nu)}{\left(\frac{h}{d}\right)^2} \left(1 + 30,2 \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^2\right), \quad (4)$$

Считая для стекла справедливой теорию прочности максимальных нормальных напряжений [8], разрушающее давление на плоскую грань поры из (4) будет

$$P_{\text{кр}} = \frac{24[\sigma] \left(\frac{h}{d}\right)^2}{(1+\nu) \left(1 + 30,2 \left(\frac{h}{d}\right)^2\right)}, \quad (5)$$

где $[\sigma]$ – предел прочности стекла при изгибе.

В свою очередь отношение $\frac{h}{d}$ зависит от плотности материала. Для определения этой зависимости были проведены исследования шлифов образцов пеностекла, полученных при различных технологических режимах и соответственно различной плотности ($\rho = 0,3...1,0 \text{ г/см}^3$). Производился статистический анализ толщин стенок граней и диаметров пор.

Характер частоты распределения толщин стенок граней наиболее близок к распределению Коши. На рис. 3 представлены графики функции распределения толщин стенок граней $F_h(h)$ для разных плотностей. С помощью этих функций можно найти степень повреждаемости пеностекла в зависимости от толщины стенки поры

$$\xi(h, \rho) = \frac{\arctg\left(\frac{h - b_h(\rho)}{a_h(\rho)}\right) + \arctg\left(\frac{b_h(\rho)}{a_h(\rho)}\right)}{\frac{\pi}{2} + \arctg\left(\frac{b_h(\rho)}{a_h(\rho)}\right)}, \quad (6)$$

где $a_h(\rho), b_h(\rho)$ – коэффициенты распределения, зависящие от плотности блока.

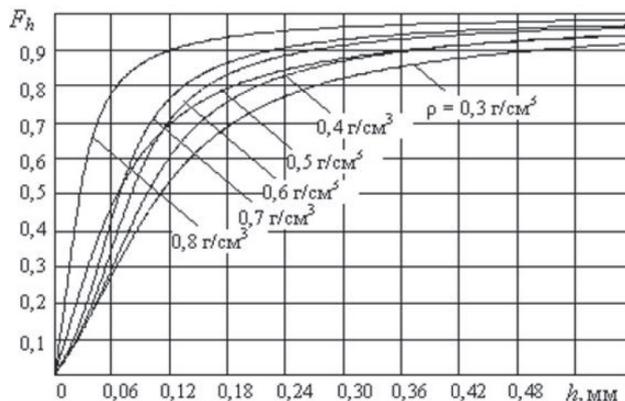


Рис. 3. Графики вероятности распределения толщин стенок граней для блоков плавучести из пеностекла с разной плотностью

Также определен характер распределения диаметров пор в срезе шлифа. Согласно этому характеру распределения, по методике [9] определено распределение истинных диаметров пор в пеностекле $F_d(d)$ (рис. 4). Характер частоты распределения диаметров пор наиболее близок к нормальному распределению. Степень повреждаемости, зависящая от диаметра пор в блоке, будет

$$\xi(d, \rho) = 1 - \frac{1}{\text{erf}\left(\frac{a_d(\rho)}{b_d(\rho)\sqrt{2}}\right) + 1} \times \left[\text{erf}\left(\frac{a_d(\rho)}{b_d(\rho)\sqrt{2}}\right) - \text{erf}\left(\frac{a_d(\rho) - d}{b_d(\rho)\sqrt{2}}\right) \right] - \zeta_T(\rho), \quad (7)$$

где $a_d(\rho), b_d(\rho)$ – коэффициенты распределения, зависящие от плотности блока, $\zeta_T(\rho)$ – функция зависимости технологической открытой пористости от плотности блока по [10].

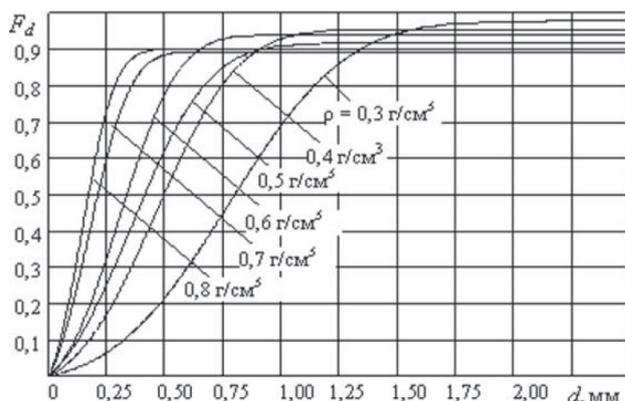


Рис. 4. Графики вероятности распределения диаметров пор для блоков плавучести из пеностекла с разной плотностью

Был проведен корреляционный и регрессионный анализ зависимости коэффициентов a_h, b_h, a_d, b_d от плотности блока в функциях (6) и (7). Результаты представлены в табл. 1. Для диаметров пор зависимость носят обратнопропорциональный характер, а для толщины стенок граней – квадратичный возрастающий.

Таблица 1

Корреляционный и регрессионный анализ связи плотности пеностекла и коэффициентов функций (6) и (7).

Коэффициент	a_h	b_h	a_d	b_d
Корреляционный коэффициент	0,699	0,663	0,621	0,603
Характер связи	средний	средний	средний	средний
Функция регрессии	$5 \cdot 10^{-8} \rho^2$	$3,4 \cdot 10^{-8} \rho^2$	$\frac{252}{\rho} - 0,053$	$\frac{075}{\rho} + 0,082$

С учетом этих соотношений можно определить повреждаемость пеностекла в зависимости от диаметра пор и толщины стенок граней. Толщина стенки грани, выраженная из (6) через повреждаемость, подставляется в выражение (5). А так как одна разрушенная грань ведет к разрушению одной поры, то

$$\xi(h, \rho) = \xi(d, \rho). \tag{8}$$

$\xi(d, \rho)$ выражается через функцию ошибок и диаметр невозможно выразить в явном виде. Таким образом, можно получить зависимость давления разрушения от повреждаемости блоков через параметр d , используя совместно преобразованное выражение (5) и уравнение (7).

$$\left\{ \begin{aligned} \rho(d, \rho) &= \frac{24\sigma_b \left(b_2(\rho) - a_2(\rho) \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{b_2(\rho)}{a_2(\rho)} \right) - \xi(d, \rho) \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{b_2(\rho)}{a_2(\rho)} \right) + 1 \right) \right) \right)^2}{(1 + \nu) \left(d^2 + 30,2 \left(b_2(\rho) - a_2(\rho) \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{b_2(\rho)}{a_2(\rho)} \right) - \xi(d, \rho) \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{b_2(\rho)}{a_2(\rho)} \right) + 1 \right) \right) \right)^2 \right)^2}, \tag{9} \\ \xi(d, \rho) &= \left(1 - \frac{\rho}{2,5} \right) \left[1 - \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{a_1(\rho)}{b_1(\rho)\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{a_1(\rho) - d}{b_1(\rho)\sqrt{2}} \right) \right) \right] - \zeta_T(\rho). \end{aligned} \right.$$

Из (9) видно, что, зная плотность материала, прочность на изгиб материала-матрицы и процент разрушившихся пор можно определить критическое давление разрушения пластин, то есть повреждаемость материала в зависимости от глубины погружения.

Повреждаемость блоков различных плотностей представлена на рис. 5. Из рисунка видно, что процесс накопления повреждений продолжается до тех пор, пока весь объем закрытых пор в блоке не заполнится водой, что достигается при давлении 63,5 МПа.

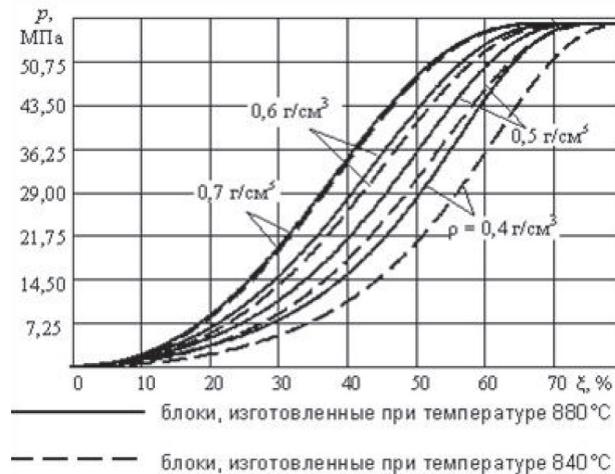


Рис. 5. Допустимое гидростатическое давление эксплуатации блоков плавучести в зависимости от уровня повреждаемости

Проведенное сравнение математической модели и результатов экспериментов по определению повреждаемости блока плавучести из пеностекла [11] показало, что теоретическое давление разрушения значительно занижено для малых уровней повреждаемости

(10 %) (рис. 6,а). При увеличении объема разрушений разрыв между теорией и экспериментом сокращается, а при 30 % повреждаемости попадает в 95 %-ный доверительный интервал экспериментальной кривой и пересекает саму кривую (рис. 6,б). Коэффициент расхожде-

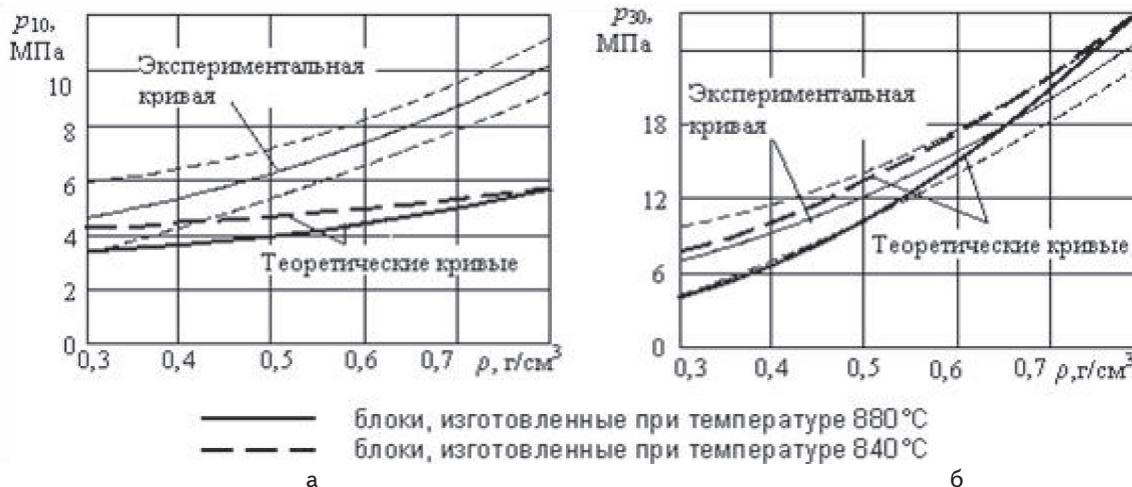


Рис. 6. Сравнение разрушающего гидростатического давления, полученного экспериментальным путем с 95 %-ным доверительным интервалом с теоретическими кривыми: а — 10 % повреждаемости блоков плавучести; б — 30 %

ния между экспериментом и теоретическими данными $k = P_{\text{экс}}/P_{\text{теор}}$ представлен в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты расхождения экспериментально полученной повреждаемости с теоретическими данными

Уровень повреждаемости блока плавучести, %	Коэффициент k для блоков плавучести разной плотности				
	0,4 г/см ³	0,5 г/см ³	0,6 г/см ³	0,7 г/см ³	0,8 г/см ³
5	1,40	1,60	1,63	1,65	1,77
10	1,45	1,50	1,67	1,68	1,70
20	1,32	1,30	1,30	1,28	1,26
30	1,28	1,20	1,10	1,07	0,95

6. Выводы

1. Построена математическая модель повреждаемости блока плавучести из закрытопористого пеностекла, что дает возможность прогнозировать его поведение при заданных рабочих давлениях.
2. Разрушающее давление зависит от соотношения толщины стенки поры в пеностекле к ее диаметру, то есть, чем больше диаметр пор, тем выше будет процент повреждаемости при одной и той же плотности блока.
3. Сравнение построенной математической модели с экспериментом показало, что модель дает ошибку в безопасную сторону, что обеспечивает запас плавучести для подводного аппарата.
4. Возможность прогнозирования повреждаемости блоков плавучести позволяет проектанту более полно и без затрат на эксперимент спрогнозировать их поведение при гидростатическом давлении и определить потерю подъемной силы подводного аппарата за счет накопления воды в блоках плавучести.

Литература

1. Демидович Б. К. Производство и применение пеностекла [Текст] / Б. К. Демидович. — Минск : Наука и техника, 1982. — 230 с.
2. Технология стекла [Текст] / под ред. И. И. Китайгородского. — М. : Химия, 1967. — 354 с.
3. Атрощенко С. А. Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках [Текст] / С. А. Атрощенко, С. И. Кривошеев, Ю. В. Петров, А. А. Уткин, Г. Д. Федоровский // Журнал технической физики. — 2002. — Т. 72, вып. 12. — С. 54–58.
4. Копийка С. В. Экспериментальное исследование повреждаемости сферопластиков [Текст] / С. В. Копийка // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв, НУК, 2006. — № 3(408). — С. 48–56.
5. Mechanics of Cellular Plastics [Text] / Edited by N. K. Hilyard. — Applied Science Publishers LTD, London, 1982. — 506 p.
6. Шилл Ф. Пеностекло(производство и применение) [Текст] : пер. с чешского / Ф. Шилл. — М. : Мир, 1985. — 307 с.
7. Прочность. Устойчивость. Колебания [Текст]. Т. 1 / под общей ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. — В 3-х т. — М. : Машиностроение, 1968. — 811 с. Ошибка! Залка не определена.
8. Яценко В. Ф. Прочность композиционных материалов [Текст] / В. Ф. Яценко. — Киев : «Вища школа», 1988. — 192 с.
9. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография [Текст] / С. А. Салтыков. — М. : Металлургия, 1978. — 271 с.
10. Соломонюк Н. С. Оптимизация состава и определение связи между свойствами закрытопористого пеностекла [Текст] / Н. С. Соломонюк // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2007. — № 1(412). — С. 47–53.
11. Соломонюк Н. С. Поверхностное водопоглощение и повреждаемость блока плавучести при гидростатическом обжатии [Текст] / Н. С. Соломонюк // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2009. — № 5 (428). — С. 54–58.

В роботі розглянута задача щодо розрахунку основних параметрів аеродинамічного сліду за вихідними кромками лопаток компресорної решітки газотурбінного двигуна.
Ключові слова: аеродинамічний слід, нерівномірність потоку, компресорна решітка.

В работе рассмотрена задача расчета основных параметров аэродинамического следа за выходными кромками лопаток компресорной решетки газотурбинного двигателя.
Ключевые слова: аэродинамический след, неравномерность потока, компрессорная решетка.

The problem of calculating the basic parameters of the aerodynamic wake behind the trailing edge of blades of compressor grating gas turbine engine is considered in the work.
Keywords: aerodynamic wake, uneven flow, compressor grating.

УДК 629.7.035.03-036.34

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АЕРОДИНАМІЧНОГО СЛІДУ ЗА ЛОПАТКОЮ КОМПРЕСОРНОЇ РЕШІТКИ

І. О. Ластівка

Кандидат технічних наук, завідувач кафедри
 Кафедра вищої математики
 Національний авіаційний університет
 просп. Космонавта Комарова, 1, м. Київ-058, Україна, 03680
Контактний тел.: (044) 406-78-34, (067)503-67-56
E-mail: iola@nau.edu.ua