

**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 заготовки.

**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 СЛУ 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 стисненні. 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/см<sup>3</sup>) внутренняя полость ячейки превращается из сферической в многогранную. Пятигранные пластинки граней ячейки (рис. 1,б) можно представить круглыми с эквивалентной площадью, заземленными 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<sub>экв</sub> — 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

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

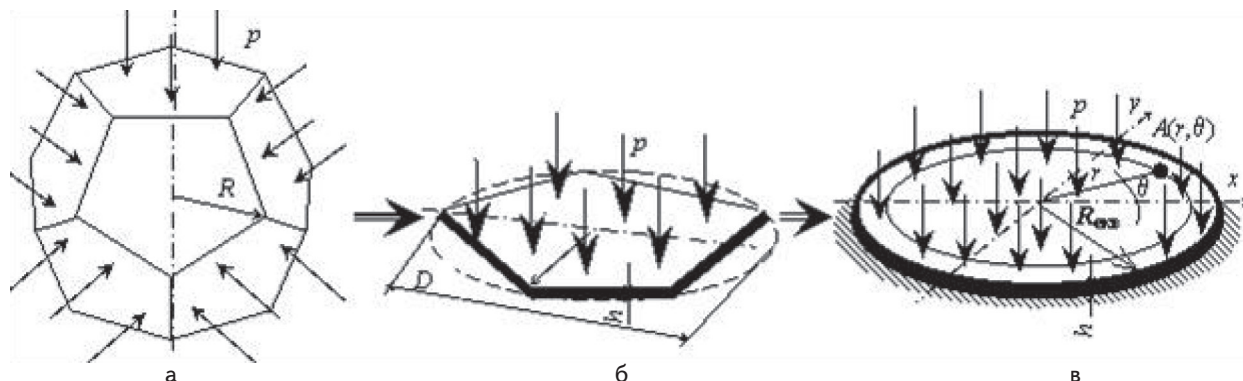
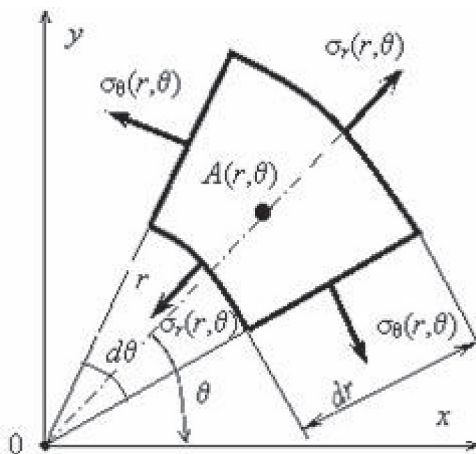


Рис. 1. Схематическое представление напряженного состояния ячейки (а) пеностекла в блоке плавучести и ее грани (б, в)



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

Радиус грани додекаэдра зависит от диаметра ячейки  $d$   
 $R_{\text{экв}} = 0,3325d$ . (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

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

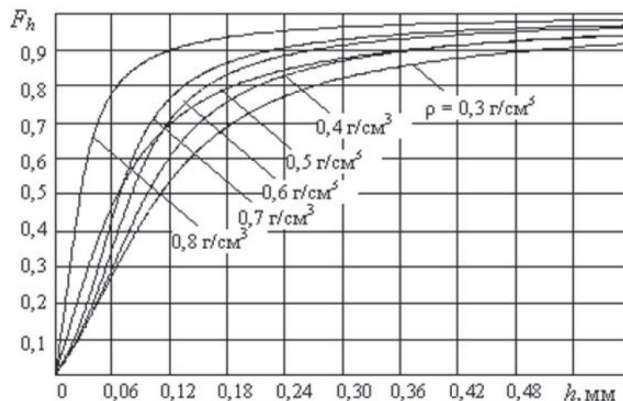
где  $[\sigma]$  – предел прочности стекла при изгибе.

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.

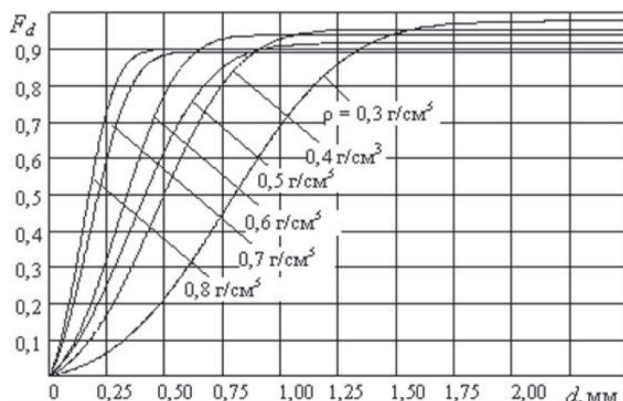


**Рис. 3.** Графики вероятности распределения толщин стенок граней для блоков плавучести из пеностекла с разной плотностью

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 зависимости 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

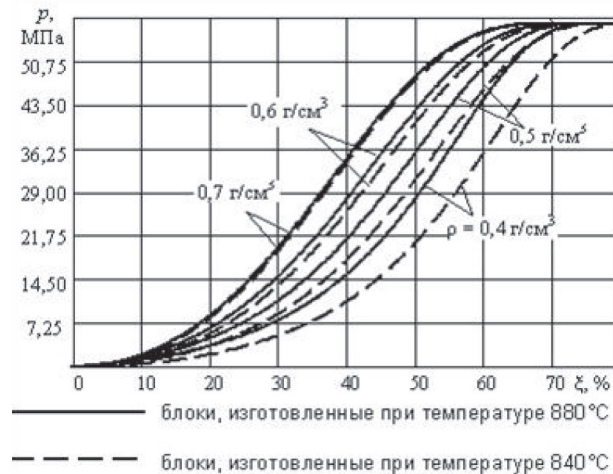
$$\xi(h, \rho) = \xi(d, \rho). \tag{8}$$

$\xi(d, \rho)$  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.

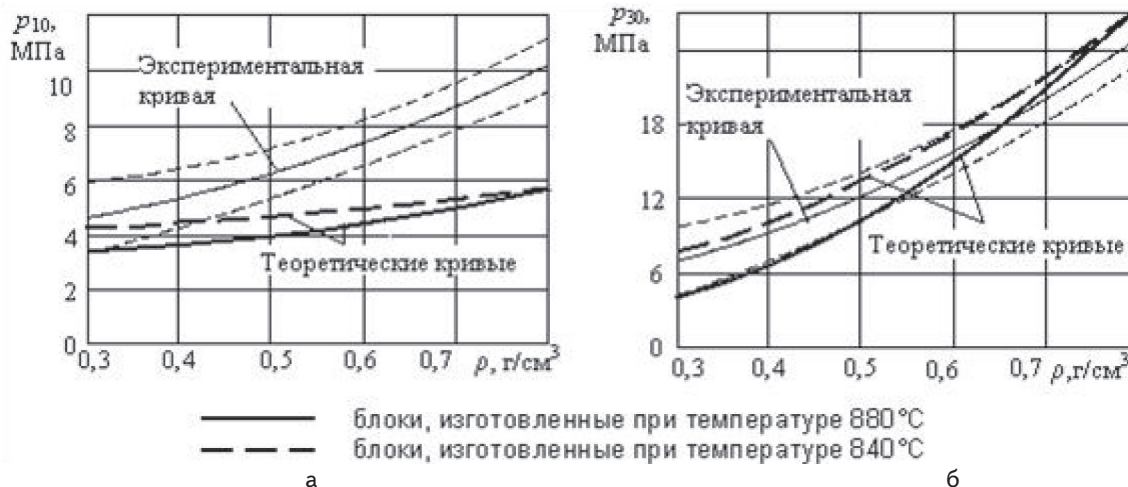
Повреждаемость блоков различных плотностей представлена на рис. 5. Из рисунка видно, что процесс накопления повреждений продолжается до тех пор, пока весь объем закрытых пор в блоке не заполнится водой, что достигается при давлении 63,5 МПа.



**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 <sup>3</sup>	0,5 г/см <sup>3</sup>	0,6 г/см <sup>3</sup>	0,7 г/см <sup>3</sup>	0,8 г/см <sup>3</sup>
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