

*Н.Э. Дымов, К.С. Лукин*  
 Вологодский государственный университет  
*С.Ю. Осипов*  
 Тверской государственный университет

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ОБОЛОЧКАХ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ДЕФОРМИРУЕМЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изложены методы расчета и оптимального проектирования оболочек из композиционных материалов при наличии и отсутствии интенсификаторов теплообмена. Рассмотрены некоторые перспективные направления интенсификации теплообмена, некоторые вопросы эффективности оболочек из композиционного материала с интенсификаторами теплообмена. Представлены распределения температур по сечению контактной поверхности движущихся оболочек из композиционных материалов.

Тепловые процессы, температура, композитные материалы.

Композиционные материалы, представляющие собой гетерогенные структуры, образованные сочетанием армирующих элементов и изотропного связующего, находят в настоящее время широкое применение в различных областях техники. Армирующие элементы определяют высокую прочность и жесткость материала, а связующие обеспечивают его монолитность. Это обстоятельство, а также коррозионная стойкость и другие свойства определяют непрерывно расширяющееся внедрение композиционных материалов в автомобилестроении и других отраслях техники. Эффективность применения композиционных материалов в оболочках определяется степенью совершенства специфических методов расчета, проектирования и изготовления изделий. Характерной особенностью рассматриваемых материалов является то, что они, как правило, образуются одновременно с изготовлением конструкции. При этом их механические характеристики, обуславливаемые схемой расположения армирующих элементов, могут изменяться в широких пределах, что позволяет получать конструкции с направленной анизотропией механических свойств, соответствующих спектру действующих нагрузок. Эффективность методов проектирования оболочек из композиционных материалов зависит от степени соответствия формы, назначения и условий эксплуатации изделия возможностям композиционных материалов, а также технологическим возможностям реализации оптимального проекта. В статье рассмотрены методы проектирования и расчета оболочек из композиционного материала без интенсификаторов и с интенсификаторами теплообмена.

При движении анизотропной оболочки из композиционного материала происходит её разогрев вследствие процессов внутреннего трения, что резко сокращает срок её службы. На тепловые процессы в оболочке будут оказывать влияние конструктивные и эксплуатационные параметры: вязко-упругие и теплофизические свойства изотропного связующего (эластомера), армирующие элементов, толщина контактного слоя, скорость движения, вид и состояние опорной поверхности. Интенсивность тепловых процессов оболочки можно понизить, варьируя ее конст-

руктивные и эксплуатационные характеристики, но для этого нужно знать зависимость температуры от перечисленных факторов, которая может быть получена в результате решения для нее уравнения теплопроводности.

Очевидно, что наиболее теплонапряженной областью движущейся оболочки из композиционного материала является зона контакта с опорной поверхностью.

В целях улучшения эксплуатационных характеристик контактная поверхность оболочки вращения оснащается специальными металлическими конструктивными элементами – шипами, – которые оказывают существенное влияние на её тепловой режим, и, как показывают экспериментальные исследования, являются интенсификаторами теплообмена. Они представляют собой металлические стержни, изготовленные из конструкционной стали. Оболочка может содержать от нескольких десятков до 200 интенсификаторов в зависимости от её размеров и условий эксплуатации.

Распределение значений коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  по поверхности оболочки в зоне контакта с опорной поверхностью имеет сложный характер, причем на среднюю величину  $\alpha$  влияет её скорость движения и частота вращения, а также наличие или отсутствие интенсификаторов теплообмена. Величина локальных коэффициентов теплоотдачи изменяется по ширине поперечного сечения оболочки. Следует отметить, что если локальные коэффициенты теплоотдачи весьма чувствительны к внешним воздействиям, то средние значения коэффициента  $\alpha$  по поверхности оболочки изменяются меньше.

Процесс теплообмена в зоне контакта оболочки из композиционного материала с опорной поверхностью описывается критериальной зависимостью вида

$$Nu = C \cdot Re^n,$$

где  $Nu = \frac{\alpha_{cp} \cdot R}{\lambda}$  – критерий Нуссельта,

$Re = \frac{V \cdot R}{\nu}$  – критерий Рейнольдса, С и n – посто-

янные,  $R$  – радиус оболочки по центру контактной поверхности,  $\alpha_{cp}$  – средняя величина коэффициента теплоотдачи по ширине контактной поверхности оболочки вращения,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды,  $V$  – скорость движения оболочки вращения,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

При средней величине коэффициента  $\alpha_{cp}$  по ширине контактной поверхности оболочки значения постоянных  $C$  и  $n$  определяем по графикам.

Так как расчеты по оценке работоспособности оболочки ведутся по максимальным температурам, то определение теплового режима оболочки для области контакта с опорной поверхностью в зависимости от эксплуатационных и конструктивных параметров является достаточным условием оценки теплонапряженности её работы.

При тепловом расчёте можем пренебречь кривизной поверхности, и центральное сечение контактной поверхности оболочки рассматривать как однородную пластину с внутренними источниками теплоты, интенсивность которых есть функция координаты  $x$ . Уравнение теплопроводности при принятых допущениях записывается в виде

$$\frac{d^2T}{dx^2} = -\frac{q_v(x)}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура,  $q_v$  – мощность источника теплообразования,  $x$  – координата.

Уравнение (1) показывает, что тепловой режим оболочки из композиционного материала определяет мощность источника теплообразования  $q_v$ . Зная распределение температуры по центру контактной поверхности оболочки в зависимости от ее конструктивных и эксплуатационных параметров и вычисляя вторую производную этой температуры по координате  $x$ , получим с точностью до постоянного множителя

мощность источника теплообразования  $\frac{q_v}{\lambda}$ .

При проведении исследований замеры температуры производились с шагом по толщине 2 мм при стационарном режиме. Для экономии времени измерения проводились одновременно двумя термомпарами с различной длиной выступающей части иглы. Каждой термопарой проводилось по 5–7 замеров в соответственных (сходных) точках оболочки. Промежуток времени между остановкой оболочки с последним замером равнялся 50–60 с. После каждого замера для

восстановления прежнего теплового состояния оболочки обкатывались в течение  $(1,2-1,8) \cdot 10^3$  с.

Съем сигналов от датчиков движущейся оболочки из композиционного материала осуществлялся с помощью десятиканального токосъемника с контактными кольцами диаметром 4 мм. Измерения температуры проводились в различных зонах оболочки вращения при изменениях скорости движения, внешней нагрузки и внутреннего давления.

Замеры температуры проводились как по центру, так и по углу контактной поверхности, а также в области боковой поверхности.

При проведении эксперимента были выбраны четыре оболочки из композиционного материала, имеющие различные эксплуатационные характеристики: оболочка 1 (O1), 2 (O2), 3 (O3) и 4 (O4) (табл.).

Исследование теплового состояния оболочек позволило получить общую картину распределения тепловых потоков по радиальному сечению: тепловая энергия, генерируемая в объеме оболочки вращения, отдается в окружающую среду на внешней поверхности и на прогрев воздуха внутри оболочки.

Изменение скорости движения оболочки из композиционного материала вызывает изменение частоты циклов деформирования и условий теплообмена, а как следствие и количества генерируемого тепла и температуры. На рисунке 1 показана зависимость максимальных температур от скорости.

Согласно экспериментальным данным получено распределение величины мощности источника теплообразования  $q_v$  по высоте оболочки для центра контактной поверхности. Характер изменения теплообразования в зависимости от скорости движения оболочки O1 без интенсификаторов теплообмена и с их

применением представлен на рисунке 2. Здесь  $\xi = \frac{x}{h}$  – относительная координата. Данные графиков показывают, что рост скорости движения оболочки  $V$  приводит к увеличению мощности теплообразования вследствие роста частоты деформаций, причем характер распределения  $q_v(\xi)$  остается практически неизменным. Из представленных зависимостей видно, что теплообразование максимально в центральной зоне (металлической основе) и минимально на контактной поверхности. Наличие интенсификаторов приводит к значительному увеличению теплообмена.

Таблица

Основные характеристики исследуемых оболочек вращения

№ п/п	Характеристика оболочки вращения	O1	O2	O3	O4
1	Наружный диаметр, мм	1035	1150	940	767
2	Максимальная ширина поперечного сечения, мм	234	280	192	160
3	Контактная поверхность: а) тип каучука б) толщина, мм	100 СК 28	100 СК 30	100 СК 27	100 СК 19
4	Количество слоев армирующих элементов	8	10	6	6
5	Максимальная радиальная нагрузка $G$ , Н	18600	27300	10000	6550
6	Внутреннее давление $P$ , МПа	0,53	0,56	0,33	0,27

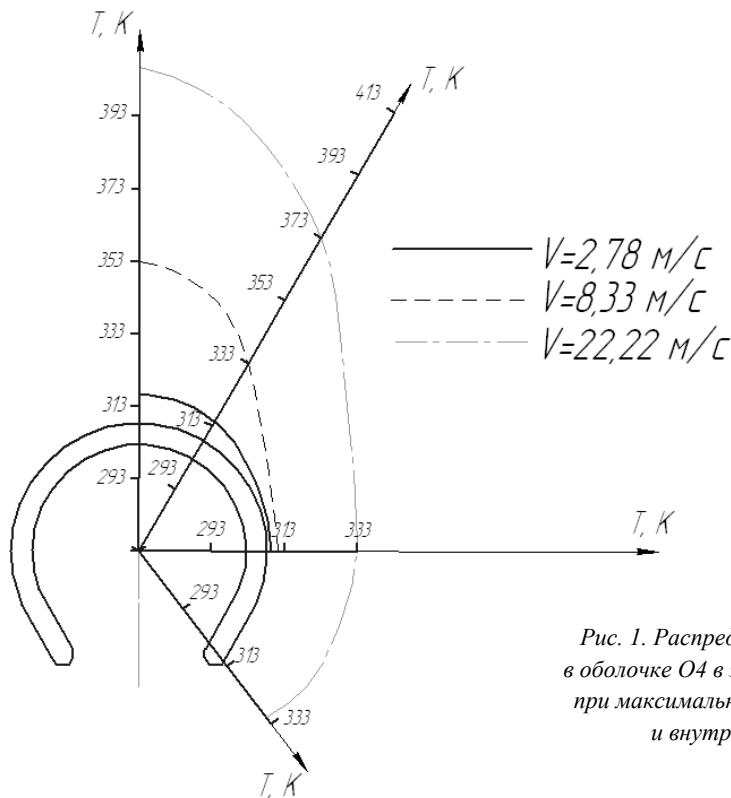


Рис. 1. Распределение максимальных температур в оболочке O4 в зависимости от скорости движения при максимальной радиальной нагрузке  $G=15500 \text{ Н}$  и внутреннем давлении  $P=0,45 \text{ МПа}$

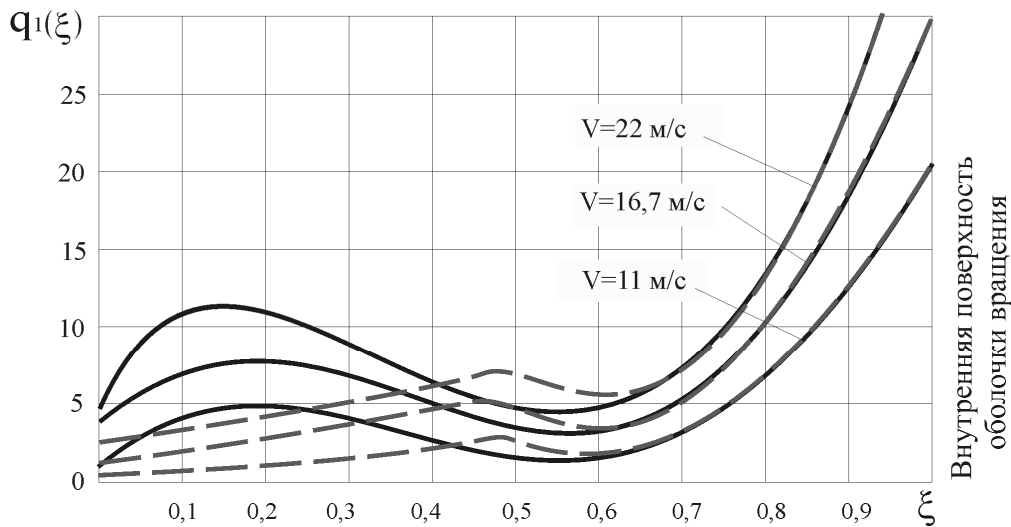


Рис. 2. Распределение безразмерной плотности источников теплоты по сечению контактной поверхности движущейся оболочки вращения O1:  
 — без интенсификаторов теплообмена,  
 - - - с интенсификаторами теплообмена

Такое распределение плотности источников теплообразования по сечению контактной поверхности оболочки может быть объяснено следующими причинами. Деформирование происходит за счет удлинения-сжатия отдельных ее элементов. Эти деформации в течение одного цикла меняются от нуля до некоторой амплитудной величины, и поэтому работа деформации изменяется от нуля до максимального значения. Элементарные объемы изотропного связующего (эластомера), находящиеся между слоями и нитями армирующих элементов, подвергаются преимущественно деформациям сдвига вследствие нерастяжимости нитей. За время одного цикла сдвиговые дефор-

мации в направлении движения меняют знак при входе и выходе из контакта, поэтому полная работа деформации и теплообразование в области армирующих элементов больше, чем в контактной зоне.

Повышение нагрузки и уменьшение давления внутри оболочки вызывает увеличение амплитуды деформаций, что приводит к росту теплообразования  $q$ .

Введём безразмерные параметры:

давление  $\bar{P} = \frac{P}{P_0}$ ; нагрузка  $\bar{G} = \frac{G}{G_0}$ ; скорость

$\bar{V} = \frac{V}{V_0}$ ; радиус  $\bar{R} = \frac{R_0}{R}$ ; координата  $\xi = \frac{x}{h}$ ,

где  $P_0$  – давление внутри оболочки;  $P$  – текущее давление;  $G_0$  – эксплуатационная нагрузка;  $G$  – текущая нагрузка;  $V_0$  – средняя скорость движения оболочки,  $V_0 = 16,7$  м/с;  $V$  – текущая скорость движения оболочки;  $R_0$  – эталонный радиус,  $R_0 = 0,5$  м;  $R$  – текущий (динамический) радиус;  $h$  – высота оболочки по центру контактной поверхности. После обработки экспериментальных данных в безразмерных комплексах получена формула для расчета мощности источника теплообразования по центру контактной поверхности:

$$\bar{q}(\xi) = \frac{\bar{V}}{R} \left[ C_0 + C_1 \xi + C_2 \xi^2 + \left( \frac{\bar{G}}{P} \right)^n C_3 \xi^3 \right], \quad (2)$$

где  $\bar{q}(\xi) = \frac{q_v h^2}{\lambda(T_g - T_0)}$ ;  $C_0, C_1, C_2, C_3$  – эмпирические коэффициенты, равные  $C_0=3,4$ ;  $C_1=50$ ;  $C_2=-172,5$ ;  $C_3=149,6$  без интенсификаторов теплообмена и  $C_0=2,9$ ;  $C_1=42$ ;  $C_2=-194,5$ ;  $C_3=124,2$  с интенсификаторами теплообмена;  $n$  – коэффициент, зависящий от конструкции оболочки и механических характеристик изотропного связующего,  $n=0,12 \div 0,20$ .

Запишем уравнение (1) в безразмерных параметрах:

$$\frac{d^2 \Theta}{d\xi^2} = \bar{q}(\xi), \quad (3)$$

где  $\Theta$  – безразмерная температура, равная:

$$\Theta(\xi) = \frac{T - T_0}{T_g - T_0}, \quad (4)$$

где  $T_0$  – температура окружающего воздуха;  $T_g$  – температура воздуха внутри оболочки вращения.

Общий интеграл уравнения (3) имеет вид

$$\Theta(\xi) = - \int \int \bar{q}(\xi) d\xi d\xi + K_1 \xi + K_2. \quad (5)$$

Постоянные  $K_1$  и  $K_2$  находим из граничных условий:

$$Bi_1 \Theta(0) = - \left( \frac{d\Theta}{d\xi} \right)_{\xi=0} = 0; \quad (6)$$

$$Bi_2 \Theta(1) = - \left( \frac{d\Theta}{d\xi} \right)_{\xi=1}. \quad (7)$$

Подставляя в граничные условия (6)–(7) выражения для  $\Theta$ , получаем систему уравнений для вычисления постоянных  $K_1$  и  $K_2$ :

$$Bi_1 K_2 = K_1; \quad (8)$$

$$Bi_2 \left[ - \int_0^1 \int_0^\xi \bar{q}(\xi) d\xi d\xi - Bi_1 K_1 + K_2 \right] = -K_2 Bi_1 - \int_0^1 \bar{q}(\xi) d\xi \quad (9)$$

Из уравнений (8)–(9) имеем:

$$K_1 = - \frac{Bi_1 (Bi_2 J_1 + J_2)}{Bi_2 - Bi_1 - Bi_1 Bi_2}, \quad (10)$$

где  $Bi = \frac{\alpha \cdot R_1}{\lambda}$  – критерий Био,

$$K_2 = - \frac{Bi_2 J_1 + J_2}{Bi_2 - Bi_1 - Bi_1 Bi_2}, \quad (11)$$

где  $J_1$  и  $J_2$  равны:

$$J_1 = \int_0^1 \int_0^\xi q(\xi_1) d\xi_1 d\xi, \quad J_2 = \int_0^1 \bar{q}(\xi) d\xi$$

или:

без интенсификаторов теплообмена

$$J_{11} = \frac{\bar{V}}{R} \left[ 7,48 \left( \frac{\bar{G}}{P} \right)^n - 4,342 \right],$$

$$J_{21} = \frac{\bar{V}}{R} \left[ 12,466 \left( \frac{\bar{G}}{P} \right)^n - 0,35 \right];$$

с интенсификаторами теплообмена

$$J_{12} = \frac{\bar{V}}{R} \left[ 6,19 \left( \frac{\bar{G}}{P} \right)^n - 5,28 \right],$$

$$J_{22} = \frac{\bar{V}}{R} \left[ 11,145 \left( \frac{\bar{G}}{P} \right)^n - 0,42 \right].$$

Таким образом, с учетом граничных условий выражение для безразмерных температур оболочки  $\Theta_1$  без интенсификаторов теплообмена и  $\Theta_2$  с интенсификаторами записывается в виде:

$$\Theta_1 = \frac{Bi_2 J_1 + J_2}{Bi_2 - Bi_1 - Bi_1 Bi_2} (1 - Bi_1 \xi) + \frac{\bar{V}}{R} \left[ 1,7 \xi^2 + 8,33 \xi^2 - 14,375 \xi^4 + 7,48 \left( \frac{\bar{G}}{P} \right)^n \xi^5 \right]^5 \quad (12)$$

$$\Theta_2 = \frac{Bi_2 J_1 + J_2}{Bi_2 - Bi_1 - Bi_1 Bi_2} (1 - Bi_1 \xi) + \frac{\bar{V}}{R} \left[ 1,3 \xi^2 + 7,21 \xi^2 - 17,52 \xi^4 + 6,3 \left( \frac{\bar{G}}{P} \right)^n \xi^5 \right]^5 \quad (13)$$

Расчет температурного поля оболочек из композиционных материалов по зависимостям (12) и (13) с учетом (2) позволяет получить распределение температуры по высоте оболочки в области контактной поверхности в зависимости от её конструктивных элементов и эксплуатационных параметров, таких как скорость движения и нормальная нагрузка  $G$ , а также наличия интенсификаторов теплообмена.

Сравнение экспериментальных и расчетных температур для оболочек без наличия и с наличием интенсификаторов теплообмена представлено на рисунках 3–5. Из графиков видно, что расчетные кривые с точностью порядка 10%, описывают характер распределения температуры по центру контактной поверхности оболочек  $O1, O2, O3$  при изменении внутреннего давления в оболочке, максимальной радиальной нагрузки  $G$  и скорости движения оболочки  $V$ .

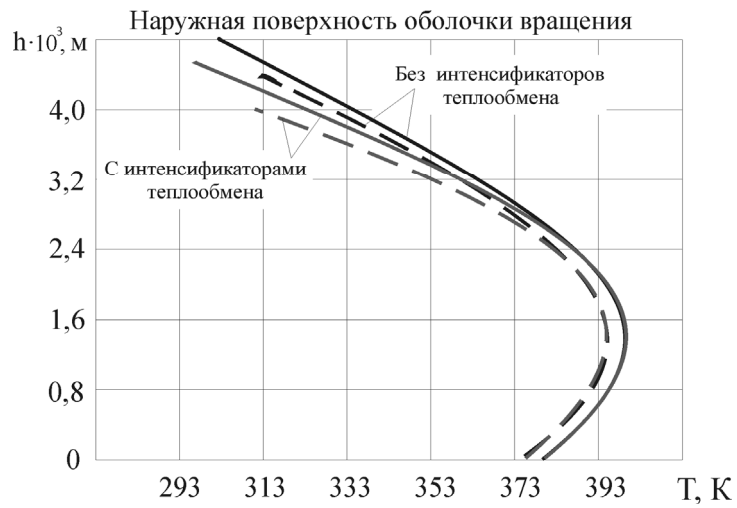


Рис. 3. Сравнение данных по температуре движущейся оболочки вращения O1 при  $G=18000$  Н,  $P=0,5$  МПа,  $V=16,7$  м/с:  
 — расчетные,  
 - - - экспериментальные

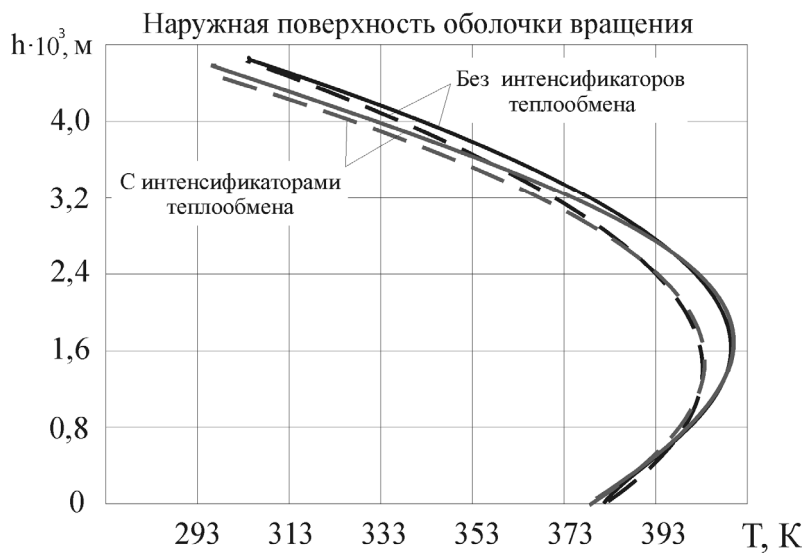


Рис. 4. Сравнение данных по температуре движущейся оболочки вращения O2 при  $G=27000$  Н,  $P=0,5$  МПа,  $V=16,7$  м/с:  
 — расчетные,  
 - - - экспериментальные

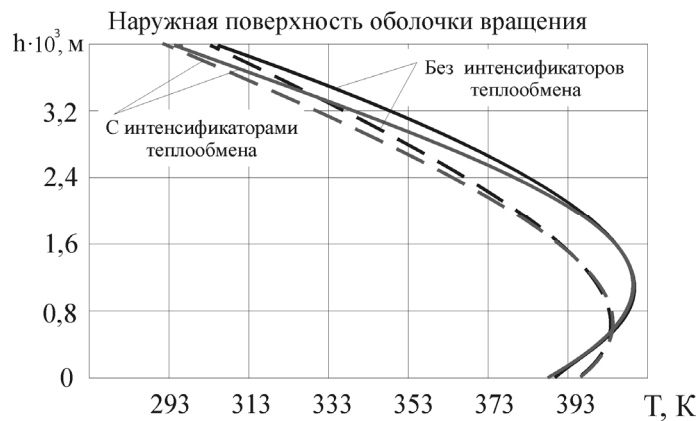


Рис. 5. Сравнение данных по температуре движущейся оболочки вращения O3 при  $G=15000$  Н,  $P=0,45$  МПа,  $V=16,7$  м/с:  
 — расчетные,  
 - - - экспериментальные

Таким образом, проведенные исследования позволили определить зависимости распределения безразмерной плотности источников теплообразования и температурных полей оболочек из композиционных материалов от их конструктивных и эксплуатационных параметров. Установлено направление тепловых потоков в радиальном сечении оболочек вращения. При одинаковой толщине контактной поверхности и размерах армирующих элементов температура оболочки вращения зависит от наличия или отсутствия интенсификаторов теплообмена [1–4].

#### Литература

1. Осипов, Ю. Р. Энергосберегающая технология крепления антикоррозионных эластомерных покрытий к металлу / Ю. Р. Осипов, С. Ю. Осипов, С. А. Шлыков // Энергосбережение и водоподготовка. – 2007. – №6 – С. 40–42.

2. Осипов, Ю. Р. Расчет теплообразования и температуры в деформируемых оболочках вращения из композиционных материалов / Ю. Р. Осипов, С. А. Шлыков, С. Ю. Осипов // Конструкции из композиционных материалов. – 2007. – № 4. – С. 7–14.

3. Осипов, С. Ю. Контактный теплообмен при взаимодействии оболочки вращения с поверхностью / С. Ю. Осипов, С. А. Шлыков, Ю. Р. Осипов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2010. – № 3 (26). – С. 112–115.

4. Осипов, Ю. Р. Моделирование процесса теплообразования в оболочке вращения / Ю. Р. Осипов, С. А. Шлыков // Автоматизация машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования : материалы второй международной научно-технической конференции (Вологда, 13-15 ноября 2006 г.) : [в 2 томах] / [ответственный редактор Ю. Р. Осипов]. – Вологда, 2006 . – С. 145–149.

**N.E. Dymov, K.S. Lukin, S.Yu. Osipov**

#### **HEAT DISTRIBUTION IN COVERS PRODUCED FROM DEFORMED COMPOSITE MATERIALS**

The calculation methods and optimum design of covers from composite materials when an enhancer is present or absent are presented. Some perspective directions of the heat exchange intensification, some issues of effectiveness of covers from composite materials with enhancers have been analyzed. Heat distribution in the section of the contact surface of the moving covers from composite materials have been shown.

Heat processes, temperature, composite materials.