Научная статья
УДК 519.87

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭТАПА ОСТЫВАНИЯ, ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Иван Алексеевич Акимов[1], Игорь Павлович Павлычев[2], Алексей Иванович Акимов[3]
[1, 3] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия
[2] Филиал РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, Оренбург, Россия
[1] akimoff@mail.ru
[2] run_0597@mail.ru
[3] akimoff11@mail.ru

Аннотация. В данной работе изложены современные подходы в исследовании третьей фазы процесса полимеризации композиционных конструкций для изготовления строительного оборудования при эксплуатации нефтяных и газовых месторождений и дана постановка задачи третьего этапа полимеризации для изделия цилиндрической формы из композиционных конструкций в специализированных установках Шольца.

Ключевые слова: композиционные конструкции, установка Шольца, полимеризация, трехточечное уравнение, уравнения Лапласа, функции Бесселя

Original article

RESEARCH OF THE COOLING STAGE, POLYMERIZATION PROCESS OF COMPOSITE STRUCTURES FOR THE MANUFACTURE OF AGRICULTURAL EQUIPMENT IN CONDITIONS OF IMPORT SUBSTITUTION

Ivan A. Akimov[1], Igor P. Pavlychev[2], Alexey I. Akimov[3]
[1, 3] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)
[2] Branch of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I. M. Gubkin in Orenburg
[1] akimoff@mail.ru
[2] run_0597@mail.ru
[3] akimoff11@mail.ru

Abstract. This work examines modern approaches in the study of the third phase of the polymerization process of composite structures for the manufacture of construction equipment during the exploitation of oil and gas fields and provides a statement of the problem of the third stage of polymerization for a cylindrical product made of composite structures in specialized Scholz installation systems.

Keywords: composite structures, Scholz installation, polymerization, three-point equation, Laplace equations, Bessel functions

В данной работе изложены современные подходы в исследовании третьей фазы процесса полимеризации композиционных конструкций для изготовления строительного оборудования при эксплуатации нефтяных и газовых месторождений и дана постановка задачи третьего этапа полимеризации для изделия цилиндрической формы из композиционных конструкций в специализированных установках Шольца.

Задачу рассмотрим в цилиндрической системе координат, где ось *x* совпадает с осью цилиндра, а начало координат лежит на плоскости одного из торцов. Примем процесс полимеризации как трехточечное уравнение. Для решения данной задачи используется метод «прогонки». Задача исследуется по радиальной схеме. Разграничиваются зоны жидкой и твердой среды. Композиционные конструкции – это материалы пятого поколения. Актуальность заключается в том, что они в разы легче стали, но не уступают им по характеристикам, а по некоторым позициям превосходят их.

Остывание композита происходит во всех направлениях, тогда можно исключить переменную φ, т. к. температура по φ будет во всем объеме постоянной:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{du}{dr}\right)+\frac{d^2u}{dz^2}=0, \tag{1}$$

где r – радиус; z – координаты; u – скорость.

Решение в виде $R(r,z)=R(r)\cdot Z(z)$. Найдем равенство

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}(rR')+v^2R=0, z''-v^2z=0, \tag{2}$$

где v – const.

Соответственно, исследуем это уравнение и приведем к виду [1]:

$$R(r)=AX_0(vr)+BY_0(vr), Z(z)=C\cdot cxvz+Dsyvz; \tag{3}$$

$X_0(vr)$ и $Y_0(vr)$ – «функции Бесселя первого и второго рода».

Придем к частным решениям уравнения Лапласа:

$$U_n = y_0(x_n \frac{r}{R_0}) \cdot \left[M_n cy \frac{x_n z}{R_0} + N_n sy \frac{x_n z}{R_0} \right], n = 1, 2... \qquad (4)$$

Разложим функции $Uc(0,\tau)$ и $Uc(\ell,\tau)$ в ряд Фурье – Бесселя, придем к виду [2]:

$$U(r,z) = \sum_{n=1}^{\infty} [Uc(0,\tau)]n \cdot \frac{sy(\frac{\ell - z)}{R_0} \cdot x_n)}{sx(x_n \frac{\ell}{R_0})} + [Uc(\ell,\tau)]n \cdot \frac{sy(x_n \frac{z}{R_0})}{sx(x_n \frac{\ell}{R_0})}, \qquad (5)$$

$$(Uc)_n = \frac{2}{R_0^2 J_1^2(x_n)} \cdot \int_0^{R_0} rf(r) n_0(x_n \frac{r}{R_0}) dr.$$

Решая дифференциальное уравнение (1), получим вид [3]:

$$R(r) = AK_0(\frac{n\pi}{\ell} r) + BK_0(\frac{n\pi}{\ell} r);\ Z(z) = D\sin(\frac{n\pi z}{\ell}).$$

где $r_0(x)$ и $K_0(x)$ – параметры мнимого аргумента. Если $K_0(\frac{n\pi}{\ell} r) \to \infty$ при $r \to \infty$, то параметр $B = 0$

Решая уравнения Лапласа, придем к виду [4]:

$$U_n = M_n r_o(\frac{n\pi}{\ell} r) \sin(\frac{n\pi}{\ell} z);\ n = 1, 2, ... \qquad (6)$$

Решение будет построено в виде ряда:

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} K_n \frac{r_0(\frac{n\pi}{\ell} z)}{y(\frac{n\pi}{\ell} R_0)} \sin(\frac{n\pi}{\ell} z), \qquad (7)$$

где K_n – параметры в исследовании функции $Uc(z,\tau)$ по $\sin(\frac{n\pi}{\ell} z)$, т. е. $K_n = \frac{2}{\ell} \int_0^{\ell} U_c(z,\tau) \sin(\frac{n\pi}{\ell} z) dz.$

Получим решение в виде:

$$U=\sum_{n=1}^{\infty}\left\{\left[U_c(0,\tau)\right]_n\cdot\frac{sr(\frac{\ell-z}{R_0}\cdot x_n)}{sz(x_n\frac{\ell}{R_0})}+\left[U_c(\ell,\tau)\right]_n\cdot\frac{sr(x_n\frac{z}{R_0})}{sz(x_n\frac{\ell}{R_0})}\right\}.$$

$$U_0(\frac{X_n}{R_0}r)+\sum_{n=1}^{\infty}K_n\frac{r_0\left(\frac{n\pi}{\ell}z\right)}{z_0\left(\frac{n\pi}{\ell}R_0\right)}\sin(\frac{n\pi}{\ell}z). \qquad (8)$$

Параметры понижения температуры представлены в виде математической модели следующего вида:

$$\frac{\partial U(r,\tau)}{\partial r}=a^2\left(\frac{\partial^2 U(r,\tau)}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial U(r,\tau)}{\partial r}\right),R_0\le r\le R,\tau>0\cdot \qquad (9)$$

НУ:

$U(r,0)=\varphi(r)$

ГУ:

$U(R_0,\tau)=U_1=\text{const}$,
$U(R,\tau)=U_1=\text{const}$.

Исследование производим в виде замещения [5]:

$$U(r,\tau)=v(r,\tau)+\psi(r) \text{ или } v(r,\tau)=U(r,\tau)-\psi(r), \qquad (10)$$

$$\frac{d^2\psi}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{d\psi}{dr}=0 \,. \qquad (11)$$

НУ:

$\psi(R_0)=U_1,\quad \psi(R)=U_2.$

Исследования показывают, что нужно строго придерживаться технологических режимов поддержания температуры на внешнем контуре изделия композитов. Изготовление композиционных конструкций дешево и без брака – большой рывок в устойчивости развития композитов в условиях импортозамещения во всех отраслях промышленности.

Список источников

1. Акимов А. И., Акимов А. И., Каракулина Е. О. Исследование теплопередачи в многослойных цилиндрических изделиях на первом этапе производства композиционных // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 68–72.

2. Акимов А. И. Применение метода изотермических поверхностей для решения задач тепломассообмена в многослойных конструкциях с изменяющимся агрегатным состоянием материалов // Образовательная среда сегодня и завтра: VIII Междунар. науч.-практ. конф. М. : Моск. техн. ин-т, 2013. С. 312–314.

3. Акимов А. И. Матричный метод решения комплексированных задач теплообмена, массообмена и термонапряжений в многослойных конструкциях с фазовыми переходами // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 60–63.

4. Исследование задачи массобмена и теплообмена на интервалах нагрева и полимеризации в многослойных композиционных цилиндрических конструкциях при помощи дифференциальных преобразований Ханкеля / А. И. Акимов, А. С. Колбинцева, Н. Г. Марченкова [и др.] // Прикладная физика и математика. 2023. № 2. С. 11–15.

5. Акимов А. И., Елисеев В. Н. Решения задачи массообмена на втором этапе полимеризации производства композиционных материалов в установках автоматического ведения технологического процесса аналитическим методом // Инженерная физика. 2022. № 6. С. 3–6.