

2. Малюшевский П.П., Юцишина А.Н., Малюшевская А.П. и др. Движение жидкости в водно-капиллярной системе при электро-разрядной делигнификации льноволокна в воде с использованием химреагентов // Электронная обработка материалов. 1998. № 4. С. 10 –19.
3. Унифицированные методы анализа вод / Под ред. Ю.Ю.Лурье. М., 1973.
4. Маргулис М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях). М., 1984.
5. Юцишина А.Н., Малюшевский П.П., Смалько А.А. и др. Йодометрическое определение электроразрядной объемной кавитации // Электронная обработка материалов. 2002. № 3. С. 41 – 44.

Поступила 25.12.02

### Summary

Influencing the schemes of a charge – discharge capacitor, members and parameters of the installations on intensity of an electrodigit cavitation is investigated. The application of an electrodischarge cavitation in manufacturing methods is shown.

---

И.А. Акимов<sup>\*</sup>, А.И. Акимов<sup>\*</sup>, М.А. Фатыхов<sup>\*\*</sup>

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ МЕТОДОМ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

<sup>\*</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет,  
ул. К. Маркса, 12, Уфа-центр, 450000, Башкортостан, Россия

<sup>\*\*</sup>Башкирский государственный педагогический университет,  
ул. Октябрьской революции, 3, Уфа-центр, 450000, Башкортостан, Россия

В современной промышленности широко используются композиционные материалы, изготавливаемые методом полимеризации. В работе рассмотрены проблемы, которые возникают при изготовлении изделий из многослойных конструкций в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП).

В процессе изготовления многослойных изделий из композиционных материалов тепло- и массообмен нередко связан с изменением агрегатного состояния тела или физико-химической природы материала. Теплофизические коэффициенты при этом изменяются скачкообразно.

### Геометрия узла установки для получения композиционных материалов

На рис.1 приведена обобщенная геометрия узла для получения композиционных материалов. Пространство между матрицей-нагревателем (1), выполненной из теплопроводящего материала, и технологическим мешком (2) заполняется многослойной стеклотканью, пропитанной связующими, жидкими материалами (3). Полимеризация компонента осуществляется за счет нагревания его в электрическом поле по заданному температурному режиму, описанному ниже.

### Температурный режим в установках автоматического ведения технологического процесса

Температурный процесс полимеризации разделяется на три этапа.

На первом этапе (в течение 1,5 – 2 ч) происходит повышение температуры изделия от начальной температуры среды до температуры 60<sup>0</sup>С, а затем под действием источников тепла с одновременным повышением давления в технологическом мешке до 9 – 10 кГ/см<sup>2</sup>.

При достижении температуры  $t_1 = 60^0\text{C}$  скорость изменения температуры понижается до нуля, и в течение 30 минут поддерживается постоянная температура (предварительный разогрев). В этот период происходит размягчение, уплотнение полимеризующейся массы, удаление воздушных пузырей и излишней влаги.

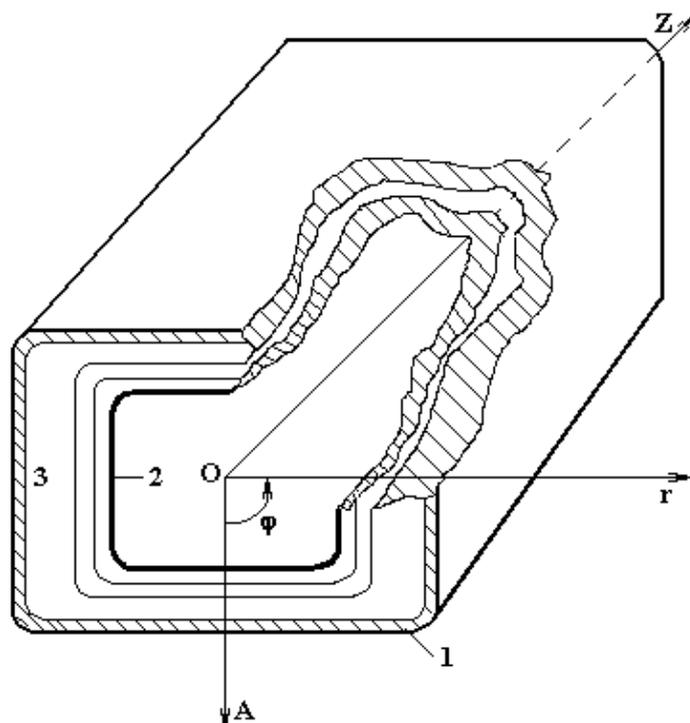


Рис.1. Геометрия узла установки для получения композиционных материалов в разрезе

На втором этапе, который продолжается 6 часов, образуется фронт полимеризации, который продвигается внутрь конструкции до технологического мешка.

Процесс полимеризации сопровождается выделением тепла фазового перехода, так что для поддержания заданной температуры необходимы специальные управляющие устройства.

На третьем этапе (3 – 4 ч) происходит охлаждение готового изделия до температуры окружающей среды.

**Критерии подобия, описывающие полимеризацию композиционных материалов**

В работе [1] приведена математическая модель, описывающая эти процессы в заготовке, имеющей форму полого многослойного цилиндрического тела, состоящего из  $n - 1$  слоев. В результате обработки этой математической модели получаем следующие критерии подобия:

Критерий тепловой гомохронности Фурье  $Fo_k = \frac{a_k \tau}{R^2}$ , характеризующий связь между скоростью изменения температурных полей, физическими свойствами рассматриваемых тел и радиусом  $R$  технологического мешка, где  $k$  – номер слоя.

Массообменный релаксационный критерий Фурье  $Fo_{k,b} = \frac{a_{bk} \tau}{R^2}$ , характеризующий связь между скоростью изменения полей распределения олигомера и физическими свойствами стеклоткани.

Критерий гидродинамической гомохронности  $H_0 = \frac{W_0 \tau}{R}$ , характеризующий скорость изменения поля скоростей в потоке воздуха во времени;  $W_0$  – скорость воздуха у входа в технологический мешок  $V_m$ .

Критерий относительной инерционности Лыкова  $Lu_k = \frac{a_{b,k}}{a_k}$  полей распределения массы и температур; модифицированный критерий Лыкова  $Lu_k^* = \frac{Lu_k}{1 - \varepsilon}$ .

Критерий Рейнольдса  $Re = \frac{W_0 \gamma_0 R}{\mu_b}$ , характеризующий гидродинамический режим движения потоков воздуха в  $V_m$ .

Критерий Прандтля  $Pr_k = \frac{\mu_b}{\gamma_0 a_k}$ , характеризующий подобие температурных и скоростных полей.

Критерий Пекле – теплового подобия  $Pe = \frac{W_0 R}{a}$ , который является мерой отношений конвективного переноса тепла к кондуктивному в потоках воздуха в  $V_m$ .

Критерий Эйлера – подобия полей давления, а следовательно, гидродинамического сопротивления,  $Eu = \frac{P_0}{\gamma_0 W_0^2}$ , который является мерой отношения сил давления и инерции в потоках воздуха в  $V_m$ .

Теплообменный критерий Кирпичева  $Ki_{q,k} = \frac{q_k(\tau)R}{\lambda_{k+1}\Delta t_e}$ , где  $q_k(\tau)$  – функция источника тепла на  $r(\varphi) = R_k(\varphi)$ , характеризует отношение потока тепла, отводимого от поверхности  $r(\varphi) = R_k(\varphi)$ , к потоку тепла, подводимого изнутри  $(k+1)$  – слоя.

Массообменный критерий Кирпичева  $Ki_{b,k} = \frac{q_{b,k}R}{a_{b,k}\gamma_b v_{b,0}}$ .

Критерий граничного подобия Био  $Bi_{k,R} = \frac{\alpha_k R_0(\varphi)}{\lambda_k}$ ;  $Bi_{k,h} = \frac{\alpha_k h}{\lambda_k}$ .

Критерий Поснова  $P_h = \frac{\Gamma_\delta \Delta t_e}{v_{b,0}}$ , где  $\Delta t_e = t_{cp} - t_0$ ,  $t_{cp}, t$  – температура окружающей среды и начальная температура материала соответственно.

Критерий Померанцева  $Po = \frac{AG}{S_{ur}} \cdot \frac{R^2}{\lambda \Delta t_e}$ .

Критерий фазового превращения Коссовича  $Ko = \frac{\sigma v_{b,0}}{C_p \Delta t_e}$ .

Модифицированный критерий Коссовича  $Ko^* = \varepsilon \cdot Ko$ .

Критерий Эккерта  $E = \frac{W_0^2}{C_p \Delta t_e}$ .

Безразмерная температура

$$\theta_k(\rho(\Psi), \Psi, \xi, Fo_k) = \frac{t_k(r(\varphi), \varphi, z, \tau) - t_0}{\Delta t_e},$$

где  $\Psi = \frac{\varphi}{2\pi}$ ,  $\xi = \frac{z}{h}$ ;  $\rho(\Psi) = \frac{r(\varphi)}{R}$ ;  $R = \min r_0(\varphi)$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ .

Безразмерное влагосодержание

$$\theta_{b,k}(\rho(\Psi), \Psi, \varepsilon, Fo_k) = \frac{v_{b,k}(r(\varphi), \varphi, z, \tau) - v_{b,0}}{v_{b,0}}.$$

Безразмерные скорости, давления, плотности и так далее

$$\bar{W} = \frac{W}{W_0}; \bar{P} = \frac{P}{P_0}; \bar{\gamma} = \frac{\gamma}{\gamma_0}; R_r = \frac{\gamma_0 R_m \Delta t_e}{P_0};$$

$$\bar{v} = \frac{U}{R};$$

где  $k = 0, 1$ ;  $\theta_e = \frac{t_e}{\Delta t_e}$ ;  $\rho_1(\Psi, Fo) = \frac{\xi(\Psi, \tau)}{R}$ ;  $K_{k,k+1} = \frac{\lambda_{k+1,b}}{\lambda_{k,b}}$ ;  $K_{k,k+1}^{(b)} = \frac{\lambda_{k+1,b}}{\lambda_{k,b}}$ ;

$$K_{ab}^{(2,1)} = \frac{a_{b,II}}{a_{b,I}}; \quad K_{k,k+1}^{(\gamma)} = \frac{\gamma_{k+1}}{\gamma_k}$$

$$U_n = \frac{\bar{U}_n}{U_0}; \quad \theta_{кр} = \frac{t_{кр}}{\Delta t_e}$$

$$\bar{U}_M = \frac{\bar{U}_M}{U_0}; \quad \gamma_{b,0} = \frac{\gamma_{b,0}}{\gamma_0};$$

$$Ki_{b,I} = \frac{q_b R}{a_{b,I} I_{b,0} g_{b,0}}.$$

В вышеуказанных выражениях приняты следующие обозначения:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $q$  – тепловой поток на границе слоя,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $r, \varphi, z$  – цилиндрические координаты;  $\tau$  – время,  $\mu_0$  – вязкость,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $C$  – теплоемкость,  $t$  – температура стенки,  $\rho$  – плотность вещества,  $P$  – давление,  $I$  – сила электрического тока,  $l$  – толщина стенки,  $\varepsilon$  – коэффициент черноты поверхности;  $S$  – площадь поверхности среды,  $G$  – весовой расход воздуха,  $A$  – тепловой эквивалент механической работы,  $\varepsilon e$  – коэффициент Джоуля–Томсона,  $v$  – скорость,  $\lambda_k$  – скрытая теплота кристаллизации,  $R_e$  – газовая постоянная,  $\sigma$  – скрытая теплота кристаллизации,  $a_{bk}$  – коэффициент массопроводности на этапе полимеризации,  $\gamma_0$  – плотность материала технологического мешка,  $P_0$  – атмосферное давление,  $\Gamma_\delta$  – термоградиентный коэффициент,  $h$  – длина установки,  $S_{зт}$  – площадь затвердевания,  $U$  – деформация материала, I, II – жидкая и твердая зоны.

Оценки показывают, что неопределяющими критериями в рассматриваемой задаче являются следующие критерии:

$$\theta_k, k = 0, 1, 2, 3, \dots, n; \theta_i, i = I, II; \theta; \theta_{b,k}, k = 1 \div n; \bar{U}_k; \bar{W}; P, \gamma; \rho_1, Ki_{b,I}.$$

Рассмотрим влияние отдельных критериев на динамику исследуемого процесса.

Режим движения в области  $V_{м,0}$  и относительная толщина пограничного слоя в потоках воздуха определяются критерием  $R_l$ . Относительная способность потока воздуха к переносу количества движения по сравнению с переносом тепла определяется критерием  $Pr$ ; для воздуха оба этих процесса существенны и поэтому можно принять  $Pr \approx 1$ . Если в  $V_{м,0}$   $Pr \gg 1$ , то в ней кондуктивный перенос тепла будет пренебрежимо мал по сравнению с конвективным переносом. В этом случае можно пренебречь теплопроводными потоками в  $V_{м,0}$ . Критерий  $Eu$  характеризует интенсивность движения воздуха: с уменьшением его значения интенсивность потока возрастает.

Диссипация энергии движения воздуха в  $V_{м,0}$ , происходящая путем перехода ее в теплоту, убывает по мере уменьшения скорости движения. При этом изменение плотности потока становится незначительным. Поэтому при малой скорости движения воздуха диссипативными членами в уравнениях теплообмена и движения в  $V_{м,0}$  можно пренебречь и считать, что  $\gamma \approx const$ . На этом основании можно принять, что и  $W \approx const$ .

При малых значениях  $Fo_k$   $\varepsilon \approx 0$ . Это вызывает уменьшение миграции массы вещества к поверхности  $S$  и тем самым интенсифицирует процесс затвердевания объекта.

Критерий  $P_{n_k}$  влияет на поле распределения массы вещества. С ростом его значений уменьшается потенциал переноса массы вещества, а следовательно, интенсифицируется процесс затвердевания объекта. В таких случаях затвердевание объекта нужно проводить при низких температурах.

Критерий  $Lu_k$  характеризует интенсивность изменения полей распределения массы вещества в области  $V_{ц,0}$  (то есть внутри многослойной заготовки) относительно изменения полей температур в этой области. При малых значениях  $Lu_k$  теплообмен происходит значительно быстрее, чем перенос массы вещества. Поэтому затвердевание области  $V_{ц,0}$  происходит с высокой скоростью. Такой процесс затвердевания имеет место в начальный период второго этапа или при повышении температуры теплового источника. Уменьшение значения критерия  $Lu_k$  достигается ускорением процесса затвердевания области  $V_{ц,0}$ .

Массообменный критерий Кирпичева  $Ki_{b,I}$  характеризует отношение потока массы вещества, подводимого из зон застывания к поверхности  $S$ , к потоку массы вещества, отводимого от этой поверхности в зону затвердевания. Из анализа содержания исследуемого процесса следует, что  $Ki_{b,I} > 0$ .

С увеличением значения  $K_{i,l}$  возрастает миграция массы вещества к поверхности  $S$ , а следовательно, снижается темп затвердевания области  $V_{ц.о.}$ . Роль этой миграции может быть доведена до минимума при быстром затвердевании изделия, то есть с увеличением скорости продвижения поверхности  $S$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов И.А., Акимов А.И., Тюков Н.И. Математическая модель процесса изготовления изделий из композиционных материалов в результате полимеризации // Труды Стерлитамакского филиала Академии наук Республики Башкортостан, 2001, Вып. 2. Уфа: Гилем. С. 6 – 9.

*Поступила 15.01.03*

### Summary

Criteria of similarity have been obtained which describe the polymerization process in multi-layer structures made of composite materials in an electric field. The paper has determined the effect of individual criteria upon the process dynamics.

---

О.Н. Сизоненко, Г.А. Барбашова, О.В. Хвощан

## К ВОПРОСУ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНЫ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАСТЕ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В СКВАЖИНЕ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Теоретическими и экспериментальными исследованиями, проведенными в различных странах в последние годы, установлено, что наиболее эффективные технологии разработки трудноизвлекаемых запасов нефти основываются на использовании различных физических полей. Накопленный нами опыт использования высоковольтного электрического разряда в скважине для воздействия на продуктивные пласты показывает, что при оптимальном выборе объектов обработки и применяемых технологических приемах можно заметно интенсифицировать фильтрационные процессы в пластах и повысить их нефтеотдачу [1 – 3].

Согласно существующим представлениям о механизме электроразрядного воздействия на пласт, преобладающее действие на изменение фильтрационных характеристик в пористой насыщенной среде нефтяного коллектора оказывают волны сжатия, создающие и развивающие радиальные и цилиндрические трещины [4]. В условиях скважины картина распространения волн сжатия из скважины в пласт усложняется ввиду наличия обсадных труб и цементного кольца между трубой и породой продуктивного коллектора. Поэтому значительный интерес представляет исследование воздействия волн сжатия при высоковольтном электрическом разряде в скважине на призабойную зону скважин, представленное в данной работе.

Для решения поставленной задачи использовались методы физического и математического моделирования. Характеристики электрического разряда получены в камере высокого давления, которая является частью экспериментального стенда для физического моделирования скважинных условий. Схема разрядной камеры электроразрядного устройства (ЭРУ) приведена на рис. 1.

При построении математической модели распространения волн сжатия в скважине приняты следующие допущения: стенки электроразрядного устройства и скважины абсолютно жесткие; канал разряда, образованный в жидкости при ее пробое [5], в начальный момент времени имеет форму прямого кругового цилиндра, высота которого равна длине межэлектродного промежутка, а ось симметрии совпадает с осью симметрии скважины и ЭРУ; стенка канала непроницаема; скважина заполнена идеальной сжимаемой жидкостью, а канал разряда – идеальной плазмой.