

## КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

**Е. А. Буракова**

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,  
elenburakova@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** катализатор; методология; синтез; система поддержки принятия решений; углеродные нанотрубки; управление.

**Аннотация:** Предложена методология создания системы информационной поддержки управления технологической системой (ТС) производства углеродных нанотрубок, обеспечивающей синтез наноструктур с заданными параметрами. При детальном изучении ТС производства УНТ установлены системные связи и закономерности функционирования ее основных элементов, определен состав информационных потоков, сформулирована постановка оптимизационной задачи и подобран способ ее решения.

---

### Введение

В связи с тем, что для каждой области применения необходимы углеродные нанотрубки (УНТ) с определенными параметрами (диаметром, длиной, степенью дефектности и др.) актуальной становится проблема организации эффективного управления технологической системой (ТС) их производства. Решение данной проблемы позволит осуществлять оперативный перевод ТС на выпуск нового типа нанотрубок с заданными параметрами.

В настоящее время управление параметрами производимых УНТ осуществляется регулированием условий реализации процессов получения катализатора – вещества, на поверхности которого происходит формирование наноструктур, и непосредственно их синтеза [1 – 3]. Такой подход к управлению ТС производства не эффективен при необходимости расширения номенклатуры выпускаемых УНТ, так как требует много времени на поиск и отработку новых составов катализатора, режимов реализации процесса синтеза наноструктур. Поэтому существующие ТС производства УНТ преимущественно ориентированы на производство одного вида наноструктур (один состав катализатора – один тип УНТ).

Организовать эффективное управление ТС производства УНТ методом газофазного химического осаждения (ГФХО), как наиболее предпочтительным методом среди известных, представляется возможным путем разработки и внедрения информационной системы поддержки принятия решений (СППР). Основная задача СППР состоит в упрощении принятия решений при выборе состава и условий получения катализатора, обеспечивающих реализацию синтеза УНТ с заданными параметрами при неизменных технологических режимах процесса ГФХО.

В работе [4] представлен один из примеров использования информационных систем, позволяющих без проведения экспериментов подбирать катализатор для реализации конкретного технологического процесса. В настоящее время информации о разработке и использовании таких информационных систем в производстве УНТ нет.

В отсутствие методологии разработать СППР в производстве катализатора для синтеза УНТ не представляется возможным. Для ее создания необходимо установить системные связи и закономерности функционирования основных элементов ТС производства УНТ, выбрать методы управления параметрами синтезируемых наноструктур.

В данной работе рассмотрена концепция организации управления ТС производства УНТ методом ГФХО, способствующая решению проблемы реализации синтеза нанотрубок с заданными параметрами.

### **Управление технологической системой производства УНТ**

В результате системного анализа функционирования промышленного производства УНТ методом ГФХО выявлены стадии и процессы, создающие предпосылки для организации эффективного управления ТС. В исследуемой ТС все элементы поделены на активные и вспомогательные. Под термином «активный элемент» подразумевается компонент технической системы, выполняющий функции, определяющие результат ее функционирования в целом. Учитывая заинтересованность производителя в сохранении условий реализации ГФХО и информации о влиянии катализатора на параметры синтезируемых УНТ [5, 6], принято решение организовать управление исследуемой системой на стадии получения катализатора. В качестве метода получения катализатора выбран метод Пекини, как наиболее простой и быстрый способ формирования металлоксидных каталитических систем.

Предварительно проведенные исследования [7, 8], позволившие экспериментально подтвердить ранее выдвинутую гипотезу о физическом воздействии на катализатор/его предшественник, как новом методе управления его свойствами (один состав – разные свойства катализатора), положены в основу методологии создания СППР. Обработка катализатора или его предшественника (раствора исходных компонентов) физическим воздействием – это вновь введенная дополнительная стадия в процесс его получения методом Пекини, которая заключается в преобразовании формируемой каталитической системы различными видами полей (ультразвуковым, магнитным, микроволновым и другими) и излучений.

Данный факт позволил сформулировать и применить принцип введения в ТС производства УНТ дополнительных активных элементов, позволяющих изменять или расширять ее функционал без изменения основных элементов исходной системы. Под дополнительными активными элементами в работе подразумеваются стадии пред- и посттермической обработки катализатора/его предшественника физическим воздействием. С учетом данного принципа осуществлена декомпозиция ТС производства УНТ и показана связь разрабатываемой СППР через лицо принимающее решение (ЛПР) с активными элементами системы. Структура данной ТС представлена на рис. 1

Анализ структуры ТС показал, что ориентирование производственной системы на получение УНТ с заданными параметрами производит ЛПР, имеющее доступ к информации от всех ее элементов. Основными производственными процессами – активными элементами данной ТС, являются процессы получения катализатора и синтеза УНТ. Так как управлять исследуемой системой предлагается на стадии обработки катализатора или его предшественника физическим воздействием, то грамотный подбор состава каталитической системы и условий реализации пред- и посттермической ее обработки с использованием информационной системы будет способствовать синтезу УНТ с заданными параметрами.

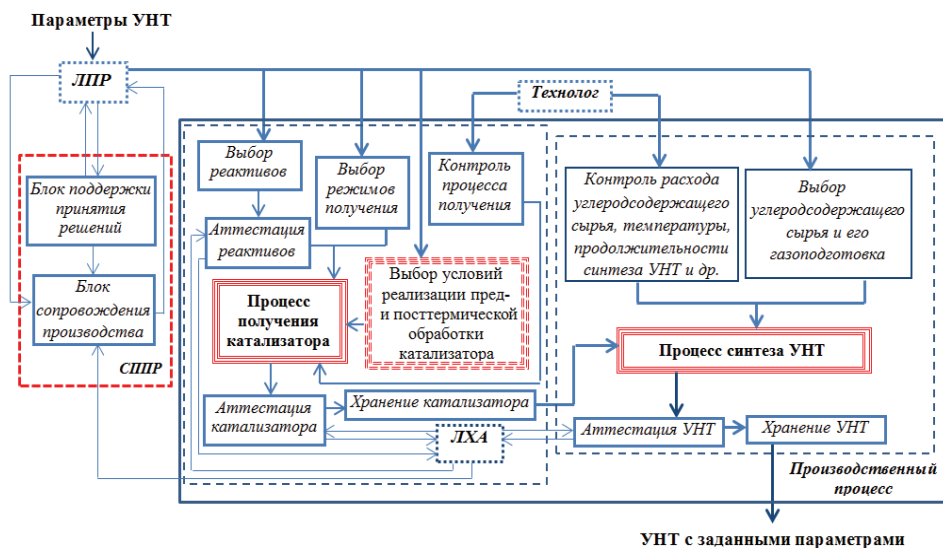


Рис. 1. Структура технологической системы производства УНТ методом ГФХО

### Методология создания системы информационной поддержки управления ТС производства УНТ

Для создания СППР разработана методология организации информационной поддержки управления параметрами УНТ на стадии получения катализатора. Согласно анализу научно-технической литературы реализации синтеза УНТ с заданными параметрами можно добиться управлением процесса получения катализатора, а именно подбором состава катализатора и условий его получения, что требует проведения большого количества экспериментов. Такой подход к управлению на производстве способствует сохранению существующей тенденции «один состав катализатора – один тип УНТ» и не предполагает быстрого перехода ТС на производство нанотрубок другого типа.

В свою очередь организовать эффективное управление ТС, позволяющее осуществлять в сжатые сроки перевод производства на выпуск наноструктур нового типа с заданными параметрами и повысить его технико-экономические показатели, возможно через постановку и решение задачи оптимизации условий получения катализатора синтеза УНТ.

Для этого, в связи с тем, что управление свойствами катализатора осуществляется с использованием нового метода, необходимо разработать методику проведения эксперимента и, реализовав ее, установить функциональные зависимости между параметрами синтезируемых УНТ и условиями обработки катализатора/его предшественника физическим воздействием. Данные зависимости будут использоваться при постановке оптимизационной задачи в качестве уравнений связей. Реализация предлагаемой методологии позволит разработать СППР, которая быстро, без проведения дополнительных экспериментов установит состав, тип и условия обработки катализатора, обеспечивающие синтез УНТ с заданными параметрами.

Структура методологии создания системы информационной поддержки управления ТС производства УНТ с учетом предлагаемого в работе принципа представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Структура методологии создания системы информационной поддержки управления ТС производства УНТ**

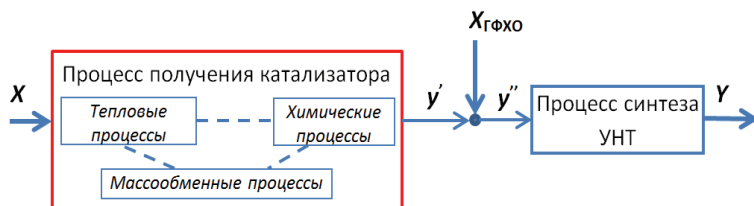
Важными задачами при реализации методологии остаются установление состава информационных потоков, выявление управляющих факторов, которые оказывают влияние на параметры синтезируемых нанотрубок, а также исследование системных связей и закономерностей функционирования активных элементов ТС производства УНТ.

Экспериментальное изучение процесса получения катализатора методом Пекини показало, что это сложно контролируемый процесс из-за одновременного и взаимосвязанного протекания процессов различной природы. Данный факт учтен при определении состава информационных потоков ТС производства УНТ (рис. 3).

Входной информационный поток процесса получения катализатора  $X$  представляет собой набор данных, характеризующих управляющие и возмущающие факторы, и может быть записан в виде

$$X = \langle C, \omega_{\text{air}}, t_0, \bar{\psi}, P, t_{\text{о.с.}}, t_{\text{п}}, t_{\text{к}}, P_{\text{атм}}, \tau_{\text{об}}, t_{\text{об}}, W_{\text{об}}, \Delta t_{\text{о.с.}}, \Delta P_{\text{атм}}, \dots \rangle,$$

где  $C$  – состав катализатора, определяющий его тип, и зависящий от содержания активного компонента, носителя и промотора;  $\omega_{\text{air}}$  – расход газовой среды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $t_0$  – температура раствора исходных компонентов катализатора,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{\psi}$  – геометрические размеры емкости для пред- и посттермической обработки катализатора/его предшественника;  $P$  – тип обработки катализатора;  $t_{\text{о.с.}}$  – температура



**Рис. 3. Схема информационных потоков в ТС производства УНТ**

окружающей среды, °С;  $t_p, t_k$  – температуры среды в рабочей зоне и слое катализатора соответственно, °С;  $P_{\text{атм}}$  – атмосферное давление, Па;  $W_{\text{об}}$  – удельная мощность обработки, Вт/м<sup>3</sup>;  $\tau_{\text{об}}$  – продолжительность обработки, с;  $t_{\text{об}}$  – температура обработки, °С;  $\Delta t_{\text{о.с.}}$  – нестабильность температуры окружающей среды;  $\Delta P_{\text{атм}}$  – нестабильность атмосферного давления.

Выходной информационный поток процесса получения катализатора  $y'$  характеризует металлоксидную форму катализатора и может быть представлен как

$$y' = \langle S_{\text{уд}}, \rho, \ell_{\text{ср}}, \chi, \dots \rangle,$$

где  $S_{\text{уд}}$  – удельная поверхность, м<sup>2</sup>/г;  $\rho$  – насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\ell_{\text{ср}}$  – средний диаметр частиц металлоксидной формы катализатора, мкм;  $\chi$  – геометрические размеры кристаллитов, мкм.

Металлоксидная форма катализатора, взаимодействуя с углеродсодержащим сырьем, в процессе синтеза УНТ претерпевает изменения. Под действием водорода она восстанавливается до металлической, поэтому выходной информационный поток процесса получения катализатора  $y'$  является по сути промежуточным в исследуемой ТС. Помимо свойств катализатора, параметры синтезируемых УНТ также определяются условиями реализации ГФХО, поэтому входной информационный поток процесса синтеза  $X_{\text{ГФХО}}$  можно представить в виде

$$X_{\text{ГФХО}} = \langle P_{\text{C}_x\text{H}_y}, G_{\text{C}_x\text{H}_y}, T_{\text{ГФХО}}, \tau_{\text{ГФХО}}, \dots \rangle,$$

где  $P_{\text{C}_x\text{H}_y}$  – тип углеродсодержащего сырья;  $G_{\text{C}_x\text{H}_y}$  – расход углеродсодержащего сырья, м<sup>3</sup>/ч;  $T_{\text{ГФХО}}$  – температура ГФХО, °С;  $\tau_{\text{ГФХО}}$  – продолжительность ГФХО, ч.

Выходной промежуточный информационный поток процесса получения катализатора  $y'$ , взаимодействуя с входным потоком процесса синтеза  $X_{\text{ГФХО}}$ , образует основной входной информационный поток процесса синтеза нанотрубок  $y''$ , который может быть записан как

$$y'' = \langle y', X_{\text{ГФХО}} \rangle.$$

Оценку эффективности предлагаемого в работе метода управления исследуемой ТС предлагается проводить по наиболее востребованным параметрам синтезируемых УНТ. Исходя из этого, выходной информационный поток процесса синтеза углеродных нанотрубок  $Y$  имеет следующий вид:

$$Y = \langle D, d, \gamma, I_{D/G}, \dots \rangle,$$

где  $D$  и  $d$  – соответственно внешний и внутренний диаметры УНТ, нм;  $\gamma$  – удельный выход, г/г<sub>кат</sub>;  $I_{D/G}$  – степень дефектности УНТ, которая определяется методом рамановской спектроскопии [9] по отношению интенсивностей мод, вызванных дефектом симметрии графенового слоя  $I_D$  и колебаниями атомов углерода в плоскости графенового слоя  $I_G$ .

Предварительное исследование влияния контролируемых, но не поддающихся управлению таких факторов, как  $P_{\text{атм}}$ ,  $t_{\text{о.с.}}$ ,  $\Delta P_{\text{атм}}$ ,  $\Delta t_{\text{о.с.}}$  показало, что оно не существенно, и при дальнейшем изучении функционирования ТС производства УНТ ими можно пренебречь.

Так как реализация синтеза УНТ с параметрами, значения которых являются наиболее близкими к заданным, возможна благодаря управлению процессом формирования катализатора, основанном не только на варьировании состава катализатора, а главным образом на его пред- и посттермической обработке физическими воздействиями, то наиболее важными управляющими факторами в данном случае являются тип  $P$ , время  $\tau_{об}$ , температура  $t_{об}$  и удельная мощность их обработки  $W_{об}$ .

Установив состав выходного информационного потока  $Y$  (рис. 3), с использованием метода аддитивной свертки частных критериев, формулируем критерий для оценки эффективности управления ТС производства УНТ в виде комплексного критерия оптимальности процесса получения катализатора. В общем виде комплексный критерий оптимальности процесса получения катализатора представляет собой сумму модулей относительных отклонений компонент информационного потока  $Y$  с соответствующими весовыми коэффициентами:

$$M = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left| \frac{z_i - z_{i0}}{z_{i0}} \right|, \quad (1)$$

где  $z_i$  – полученное значение, а  $z_{i0}$  – заданное значение параметра, являющегося компонентой информационного потока  $Y$ ;  $n$  – количество параметров, характеризующих данный информационный поток;  $\alpha_i$  – весовой коэффициент.

Значения весовых коэффициентов определяются областью применения синтезируемых УНТ на основе экспертной оценки.

Согласно предлагаемой методологии создания системы информационной поддержки управления ТС производства УНТ (см. рис. 2), оптимизационная задача сводится к определению состава, типа и условий обработки катализатора/его предшественника физическим воздействием. Так как процессы их пред- и посттермической обработки физическим воздействием являются сложными и до конца не изученными совмещенными процессами, то применение аналитических и экспериментально-аналитических математических моделей для их описания на данном этапе нецелесообразно. Поэтому при постановке оптимизационной задачи в качестве уравнений связей предложено использовать функциональные зависимости, полученные на основе обработки экспериментальных данных.

Для формализации оптимизационной задачи необходимо установить функциональные зависимости параметров, характеризующих выходной информационный поток  $Y$ , от состава катализатора, типа и условий физического воздействия на него и его предшественника. В соответствии с методологией (см. рис. 2) аппроксимационные зависимости рекомендуется представлять в следующем виде:

$$Y(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) = \begin{cases} C = 1: & D_1 = f_{D1}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \quad d_1 = f_{d1}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ P = 1 & \gamma_1 = f_{\gamma1}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \quad I_{D/G1} = f_{I_{D/G1}}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ C = 1: & D_2 = f_{D2}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \quad d_2 = f_{d2}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ P = 2: & \gamma_2 = f_{\gamma2}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \quad I_{D/G2} = f_{I_{D/G2}}(\tau_{об}, t_{об}, W_{об}); \\ C = \dots: & \dots; \\ P = \dots: & \dots \end{cases} \quad (2)$$

При этом состав катализатора и тип физического воздействия являются дискретными величинами, а параметры синтезированных УНТ, определяемые условиями физического воздействия, – непрерывными.

На основе информации о составе информационных потоков общая постановка задачи оптимизации условий получения катализатора принимает следующий вид: для синтеза УНТ с заданными значениями параметров  $D_0$ ,  $d_0$ ,  $\gamma_0$ ,  $I_{D/G0}$  необходимо найти такие значения

$$C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об},$$

при которых критерий оптимальности (1) с учетом ограничений:

$$C = \overline{1, N_C}; P = \overline{0, N_P};$$

$$\tau_{об} \in [\tau_{об \min}; \tau_{об \max}]; t_{об} \in [t_{об \min}; t_{об \max}]; W_{об} \in [W_{об \min}; W_{об \max}]$$

и связей (2) принимает минимальное значение, где  $N_C$ ,  $N_P$  – количество составов катализатора и типов физического воздействия. Учитывая состав выходного информационного потока  $Y$  исследуемой производственной системы, критерий оптимальности можно представить в следующем виде:

$$M = \alpha_D \left| \frac{D(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - D_0}{D_0} \right| + \alpha_d \left| \frac{d(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - d_0}{d_0} \right| + \\ + \alpha_\gamma \left| \frac{\gamma(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - \gamma_0}{\gamma_0} \right| + \alpha_{I_{D/G}} \left| \frac{I_{D/G}(C, P, \tau_{об}, t_{об}, W_{об}) - I_{D/G0}}{I_{D/G0}} \right| + \dots \rightarrow \min$$

Для решения данной оптимизационной задачи предлагается использовать метод сканирования, как метод, гарантирующий нахождение глобального минимума целевой функции. Решение оптимизационной задачи позволит перейти к созданию СППР в производстве катализаторов, обеспечивающей реализацию синтеза УНТ с заданными параметрами.

### Система поддержки принятия решений

Система поддержки принятия решений, разработанная в ходе реализации методологии, представляет собой модуль поиска минимума целевой функции и базу данных. При ее создании рекомендуется использовать метод анализа иерархий [10], позволяющий ЛПР оценивать все возможные варианты организации процесса получения катализатора. Принцип функционирования СППР состоит в том, что модуль поиска минимума целевой функции через пользовательский интерфейс от ЛПР получает информацию о значениях параметров УНТ, которые необходимо синтезировать для Заказчика. На основе данной информации модуль осуществляет поиск всех возможных сочетаний типов катализатора и обработки их физическим воздействием. Для каждого сочетания он из базы данных определяет набор зависимостей:  $D = f_D(\dots)$ ;  $d = f_d(\dots)$ ;  $\gamma = f_\gamma(\dots)$ ;  $D/G = f_{D/G}(\dots)$  в виде аппроксимирующих функций от  $\tau_{об}$ ,  $t_{об}$  и  $W_{об}$ , полученных в результате обработки экспериментальных данных. Методом сканирования определяется минимум целевой функции, которая характеризует степень отклонения значений параметров синтезируемых УНТ от заданных, и сохраняются значения найденных условий реализации пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественника физическим воздействием. Процедура обращения модуля поиска минимума целевой функции к базе данных повторяется для всех возможных вариантов, что приводит к формированию последовательности режимов, отсортированных по возрастанию значения целевой функции.



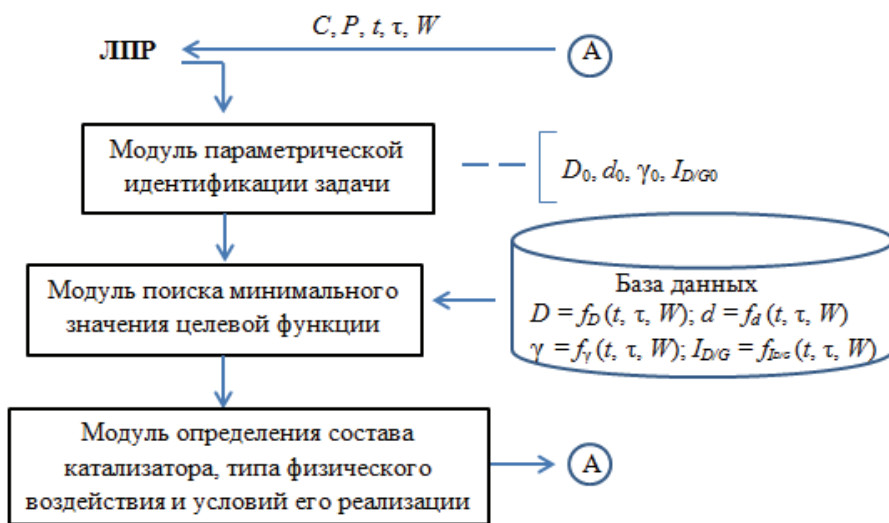


Рис. 4. Структурная схема функционирования СППР

Данный рейтинг предоставляется ЛПР для выбора режимов получения катализатора, обеспечивающего синтез УНТ с параметрами, значения которых наиболее близки к заданным, с учетом интересов производителя и производственных возможностей на данный момент. Система поддержки принятия решений предусматривает возможность ЛПР сузить поиск, ограничив информационную систему выбором предпочитаемых типов углеродсодержащих газов и составов катализатора, используемых в производстве.

Сведения об условиях получения катализатора и обработки его физическим воздействием предлагается хранить в базе данных иерархического типа в открытом формате. Такой подход не требует сложных систем обслуживания базы данных и позволяет легко вводить в нее информацию о новых составах и методах обработки катализатора/его предшественника физическим воздействием.

Структурная схема функционирования СППР представлена на рис. 4.

В соответствии с предложенной методологией на базе Borland Delphi 7 создана и зарегистрирована СППР при производстве катализатора синтеза УНТ, которая показала свою эффективность при производстве УНТ на базе ООО «НаноТЦ» и АО «ЗАВКОМ» [12]. На основе информации, полученной от СППР, на территории АО «ЗАВКОМ» создано опытно-промышленное производство  $\text{Co-Mo/Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  катализатора, обеспечивающего синтез коаксиальных УНТ диаметром 8...15 нм и степенью дефектности  $\sim 1$ .

Использование информационной системы [11] в производстве катализатора синтеза УНТ способствовало сокращению времени, необходимого для перехода исследуемой ТС на выпуск новых типов наноструктур и снижению нагрузки на химика-технолога. Это доказывает правомерность использования предлагаемой в работе концепции управления ТС производства углеродных нанотрубок методом ГФХО.

### Заключение

Предлагаемая в работе концепция управления технологической системой производства УНТ методом ГФХО включает в себя новый метод управления свойствами катализатора путем обработки его физическим воздействием, принцип



введения в исследуемую систему дополнительных активных элементов, позволяющих изменять или расширять ее функционал без изменения исходных основных элементов.

Детальное изучение ТС производства УНТ позволило установить системные связи и закономерности функционирования ее основных элементов, определить состав информационных потоков, сформулировать постановку оптимизационной задачи, подобрать способы ее решения и перейти к созданию информационной системы поддержки принятия решения. Введение в технологическую систему производства нанотрубок СППР и стадий пред- и посттермической обработки катализатора/его предшественника физическим воздействием, как дополнительных активных элементов, позволяющих решить проблему организации эффективного управления данной системой, способствует расширению номенклатуры выпускаемых наноструктур и ее быстрому переводу на выпуск нанотрубок с заданными параметрами. Эффективность СППР, созданной на основе разработанной методологии, подтверждается фактом ее использования в реальном производстве УНТ.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 22-23-01072).*

#### *Список литературы*

1. Evidence of Correlation Between Catalyst Particles and the Single-Wall Carbon Nanotube Diameter: a First Step Towards Chirality Control / M. Fiawoo, A. Bonnot, H. Amara [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2012. – Vol. 108 (19). – P. 195503. doi: 10.1103/PhysRevLett.108.195503

2. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.

3. Кульметьева, В. Б. Влияние условий каталитического пиролиза паров этанола на характеристики углеродных нанотрубок / В. Б. Кульметьева, И. А. Мальцев // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 6. – URL : <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16012> (дата обращения: 22.09.2022).

4. Разработка информационной системы выбора и расчета катализаторов на основе ВПЯМ / С. В. Прокудин, А. В. Беспалов, В. Н. Грунский, А. И. Козлов // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2007. – Т. 21, № 2 (70). – С. 79 – 84.

5. Чесноков, В. В. Особенности механизма образования углеродных нанонитей с различной кристаллографической структурой из углеводородов на катализаторах содержащих металлы подгруппы железа / В. В. Чесноков, Р. А. Буянов // *Критические технологии. Мембраны*. – 2005. – № 4 (28). – С. 75 – 79.

6. Царева, С. Ю. Исследование влияния природы и размера частиц катализатора на образование нанотрубок в методе каталитического пиролиза углеводородов / С. Ю. Царева, Е. В. Жариков, А. Н. Коваленко // *Наукоемкие технологии*. – 2004. – № 6. – С. 38 – 42.

7. Буракова, Е. А. Управление процессом формирования катализатора для синтеза углеродных наноструктурных материалов / Е. А. Буракова // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 127 – 138. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.127-138

8. Experimental and Simulation Studies to Determine the Mechanisms of Catalyst Formation for the Targeted Synthesis of Carbon Nanotubes / I. Ali, E. Burakova, A. Tkachev [et al.] // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2021. – Vol. 23, No. 9. – P. 198. doi: 10.1007/s11051-021-05320-3

9. Ferrari, A. Interpretation of Raman Spectra of Disordered and Amorphous Carbon / A. Ferrari, J. Robertson // *Physical Review B*. – 2000. – Vol. 61, No. 20. – P. 14095 – 14107. doi: 10.1103/PhysRevB.61.14095

10. Рыбак, В. А. Аналитический обзор и сравнение существующих технологий поддержки принятия решений / В. А. Рыбак, Шокар Ахмад // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 3. – С. 12 – 18.

11. Буракова, Е. А. Информационная поддержка принятия решений при производстве катализатора синтеза углеродных нанотрубок / Е. А. Буракова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 3 (55). – С. 9 – 15. doi: 10.21672/2074-1707.2021.55.3.009-015

12. Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2022610403. Модуль информационной системы поддержки принятия решения при производстве катализаторов для синтеза углеродных нанотрубок / Е. А. Буракова, Г. Ю. Юрков, А. В. Рухов, Е. С. Бакунин, А. Г. Ткачев, О. С. Неверова (РФ). – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 11 января 2022 г.

---

## The Concept of Managing the Process System for the Production of Carbon Nanotubes

E. A. Burakova

*Department of Equipment and Technology for Nanoproduction,  
elenburakova@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** catalyst; methodology; synthesis; decision support system; carbon nanotubes; control.

**Abstract:** The paper proposes a methodology for creating an information support system to manage the process system for the production of carbon nanotubes, which provides the synthesis of nanostructures with specified parameters. A detailed study of the process system for the production of CNTs established systemic relationships and patterns of functioning of its main elements, determined the composition of information flows, formulated an optimization problem, and found a method for solving it.

### References

1. Fiawoo M., Bonnot A., Amara H., Bichara C., Thibault-Pénisson J., Loiseau A. Evidence of Correlation Between Catalyst Particles and the Single-Wall Carbon Nanotube Diameter: a First Step Towards Chirality Control, *Physical Review Letters*, 2012, vol. 108 (19), p. 195503, doi: 10.1103/PhysRevLett.108.195503

2. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, properties, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)

3. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16012> (accessed 22 September 2022).

4. Prokudin S.V., Bepalov A.V., Grunskiy V.N., Kozlov A.I. [Development of an information system for selecting and calculating catalysts based on HPCM], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2007, vol. 21, no. 2 (70), pp. 79-84. (In Russ.)

5. Chesnokov V.V., Buyanov R.A. [Features of the mechanism of formation of carbon nanowires with different crystallographic structure from hydrocarbons on catalysts containing metals of the iron subgroup], *Kriticheskiye tekhnologii. Membrany* [Critical Technologies. Membranes], 2005, no. 4 (28), pp. 75-79. (In Russ.)

6. Tsareva S.Yu., Zharikov Ye.V., Kovalenko A.N. [Study of the influence of the nature and size of catalyst particles on the formation of nanotubes in the method of catalytic pyrolysis of hydrocarbons], *Naukoyemkiye tekhnologii* [Science-intensive technologies], 2004, no. 6, pp. 38-42. (In Russ.)

7. Burakova Ye.A. [Control of the formation of a catalyst for the synthesis of carbon nanostructured materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 127-138, doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.127-138 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Ali I., Burakova E., Tkachev A. [et al.] Experimental and Simulation Studies to Determine the Mechanisms of Catalyst Formation for the Targeted Synthesis of Carbon Nanotubes, *Journal of Nanoparticle Research*, 2021, vol. 23, no. 9, p. 198, doi: 10.1007/s11051-021-05320-3

9. Ferrari A., Robertson J. Interpretation of Raman Spectra of Disordered and Amorphous Carbon, *Physical Review B*, 2000, vol. 61, no. 20, pp. 14095-14107, doi: 10.1103/PhysRevB.61.14095

10. Rybak V.A., Shokr Akhmad [Analytical review and comparison of existing decision support technologies], *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [System analysis and applied informatics], 2016, no. 3, pp. 12-18. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Burakova Ye.A. [Information support for decision-making in the production of a catalyst for the synthesis of carbon nanotubes], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2021, no. 3 (55), pp. 9-15, doi: 10.21672/2074-1707.2021.55.3.009-015 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Burakova Ye.A., Yurkov G.Yu., Rukhov A.V., Bakunin Ye.S., Tkachev A.G., Neverova O.S. *Modul' informatsionnoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniya pri proizvodstve katalizatorov dlya sinteza uglerodnykh nanotrubok* [Decision Support Information System Module for the Production of Catalysts for the Synthesis of Carbon Nanotubes], Russian Federation, 2022, Certificate of state registration of computer programs No. 2022610403. (In Russ.)

---

## **Das Konzept der Steuerung des technologischen Produktionssystems der Kohlenstoff-Nanoröhren**

**Zusammenfassung:** Es ist eine Methodik zur Schaffung des Informationsunterstützungssystems zur Steuerung des technologischen Systems zur Herstellung von Kohlenstoffnanoröhren vorgeschlagen, das die Synthese von Nanostrukturen mit festgelegten Parametern bereitstellt. Eine detaillierte Studie des TS zur Herstellung von CNTs ermöglichte es, systemische Beziehungen und Funktionsmuster seiner Hauptelemente festzustellen, die Zusammensetzung von Informationsflüssen zu bestimmen, ein Optimierungsproblem zu formulieren und Methoden zu seiner Lösung auszuwählen.

---

## **Conception de la commande du système technologique de la production des nanotubes de carbone**

**Résumé:** Est proposée une méthodologie pour la création d'un système d'information pour la commande d'un système technologique de la production des nanotubes de carbone permettant la synthèse des nanostructures avec des paramètres prédéfinis. Sont établis des liens systémiques et des modèles de fonctionnement de éléments de base système. Est déterminée la composition des flux d'information. Est formulé le problème d'optimisation. Sont choisis les moyens de la résolution.

---

**Автор:** *Буракова Елена Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.