

## Раздел VII. Нанотехнологии

УДК 66.012.55 + 66.012.52

**А.В. Мележик, А.В. Рухов, Е.Н. Туголуков, О.Н. Бычков, С.А. Котельников,  
А.Г. Ткачев**

### **ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ КОНВЕРСИИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ВЕЩЕСТВ В УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ**

*Исследованы зависимости массового выхода углеродных нанотрубок и конверсии веществ-предшественников в углерод от температуры и скорости подачи газообразных компонентов в реактор при использовании различных исходных веществ – источников углерода (пропан-бутан, ацетон, этанол). Выходы наноуглерода и конверсия исходных веществ в углерод проходят через максимум или снижаются с увеличением скорости подачи газообразных компонентов, что объясняется участием промежуточных продуктов термических превращений исходных веществ в процессе роста наноуглерода. Предложена макрокинетическая модель зависимости выхода наноуглерода от времени.*

*Углеродные нанотрубки; CVD; катализатор; конверсия; пропан-бутан; ацетон; этанол.*

**A.V. Melezhik, A.V. Rukhov, E.N. Tugolukov, O.N. Bychkov, S.A. Kotelnikov,  
A.G. Tkachev**

### **DEPENDENCES OF CARBON NANO-TUBES MASS YIELD FROM TECHNOLOGIES**

*Dependences of carbon nanotubes mass yield and conversion of substances – carbon precursors into carbon on temperature and gaseous components feed rate were studied. Propane-butane, acetone, and ethanol were used as carbon precursors for CVD synthesis of carbon nanotubes. Yield of nanostructured carbon and conversion of carbon precursors into carbon pass through a maximum or drop with increasing feed rate of gaseous components. Such behaviour was explained by participation of intermediate products of thermal transformations of starting substances in the process of carbon nanotubes growing. Macrokinetic model of dependence of nanocarbon yield on time was proposed.*

*Carbon nanotube; CVD; catalyst; conversion; propane-butane; acetone; ethanol.*

**Введение.** В настоящее время широко применяется технология получения углеродных нанотрубок (УНТ) путем химического осаждения из газовой фазы (CVD). Влияние различных технологических факторов на процесс синтеза УНТ широко исследовалось и описано во многих литературных источниках [1–9]. Наиболее важным технологическими параметрами в данном процессе являются природа веществ-источников углерода, подаваемых в реактор, концентрация и массовая скорость подачи компонентов, температура в зоне роста углеродных нанотрубок, состав и условия подготовки катализатора, температурный режим подготовки газовой смеси, время контактирования компонентов газовой смеси с катализатором.

При синтезе УНТ в лабораторных условиях конверсия исходных углеродсодержащих веществ в УНТ обычно не является критическим фактором и зачастую ее не определяют. Однако в масштабе опытно-промышленного производства степень конверсии исходных углеродсодержащих веществ в углерод (УНТ) является

важной, потому что определяет затраты сырья на единицу произведенного продукта. Кроме того, низкая конверсия сырья в целевой продукт часто сопровождается повышенным образованием побочных продуктов, среди которых могут быть токсичные и экологически вредные вещества.

Целью настоящей работы является исследование зависимости выхода УНТ и степени конверсии различных углеродсодержащих веществ в УНТ от технологических режимов.

**Методы эксперимента.** В качестве исходных углерода содержащих веществ применяли: пропан-бутан технический по ГОСТ 20448-90, ацетон (ЧДА), этанол (96 %). В качестве инертного газа для продувки реактора и разбавления паров углеродсодержащих веществ применяли аргон ГОСТ 10157-79 (99,987 %). В опытах с ацетоном проводили предварительное восстановление катализатора смесью водорода (99,98 %) и аргона (1:1 об.). С другими источниками углерода в предварительном восстановлении катализатора водородом не было необходимости, поскольку пропан-бутан, этанол и продукты их термических превращений сами являются хорошими восстановителями при температуре проведения процесса. В качестве катализаторов для выращивания УНТ применяли сложный металлооксидный катализатор состава (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ni/MgO.

Углеродные нанотрубки выращивали при атмосферном давлении в горизонтальном трубчатом кварцевом реакторе внутренним диаметром 37 мм и длиной 1150 мм со шлифами с обеих сторон. Газы вводили и выводили из реактора через шлифованные кварцевые насадки. Реактор находился в трубчатой печи ПТ-1,2-70 НПП «Теплоприбор». Объем горячей зоны реактора можно оценить приблизительно 0,5 л. Навески катализатора помещали в реактор на полуцилиндрических подложках длиной 300 мм из графитовой фольги «Графлекс».

Регулировка скорости подачи газов в реактор осуществлялась с помощью электронного регулятора расхода газов «MassFlow». Скорости подачи газов приведены к нормальным условиям. Ацетон и этанол подавали в реактор через испаритель, снабженный нагревателем с регулируемой мощностью. Регулировка скорости подачи ацетона и этанола осуществлялась с помощью шприцевого дозатора ДШВ-01.

Выход углеродных нанотрубок ( $K_y$ ) оценивался как отношение массы углеродного продукта (без массы катализатора) к единице массы восстановленного катализатора.

Электронные изображения углеродных нанотрубок получали с помощью двух лучевого растрового электронного микроскопического комплекса Neon 40, CarlZeiss, растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D и просвечивающего электронного микроскопа Jeol JEM-2100.

**Результаты и обсуждение.** На рис. 1 приведены зависимости выхода УНТ из ацетона от температуры на катализаторе (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (кривая 1), выхода УНТ из этанола от температуры на том же катализаторе, (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (кривая 2) и выхода УНТ из этанола от температуры на катализаторе Ni/MgO (кривая 3). Зависимость представленная кривой 1 (рис. 1) получена при скорости подачи ацетона (жид.) 18,3 мл/час, аргона 1 л/мин, время синтеза 30 мин. Перед пуском ацетона катализаторы были предварительно восстановлены в смеси аргона с водородом (1:1 об.) при той же температуре в течении 15 мин. Как видно, оптимальная по выходу УНТ температура для системы ацетон – катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 1, кривая 1) составляет 700 °С. Зависимость представленная кривой 2 (рис. 1) получена при скорости подачи этанола (жид.) 20 мл/час, аргона 0,5 л/мин, время синтеза 30 мин. Видно, оптимальная по выходу УНТ температура для системы этанол – катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 1, кривая 2) составляет 750 °С. За-

висимость представленная кривой 3 (рис. 1) получена при скорости подачи этанола (жид.) 20 мл/час, аргона 0,5 л/мин, время синтеза 30 мин. Как видно, оптимальная по выходу УНТ температура для системы этанол – катализатор Ni/MgO (рис. 1, кривая 3) составляет 700 °С.

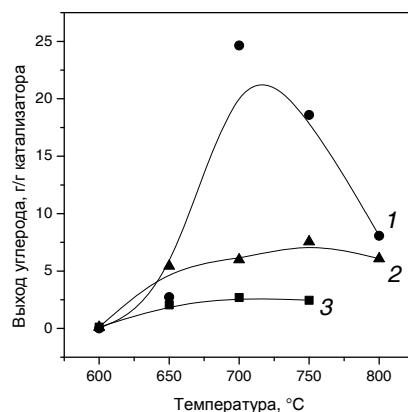


Рис. 1. Зависимость выхода углерода от температуры: 1 – система ацетон – катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 – система этанол – катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – система этанол – катализатор Ni/MgO

Оптимальная температура для получения УНТ из пропан-бутана была найдена ранее и составила 650 °С [10]. Последующие эксперименты проводили при найденных оптимальных температурах.

На рис. 2 приведены зависимости выхода наноуглерода, а на рис. 3 – степень конверсии углеродсодержащих веществ от скорости подачи аргона в реактор при постоянной скорости подачи: пропан-бутана на катализаторе (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (кривые 1), ацетона на катализаторе (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (кривые 2), этанола на катализаторе (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (кривая 3), этанола на катализаторе Ni/MgO (кривые 4). На рис. 2 кривая 4 дополнительно представлена в более наглядном масштабе во вставке, обозначение осей соответствует основному графику).

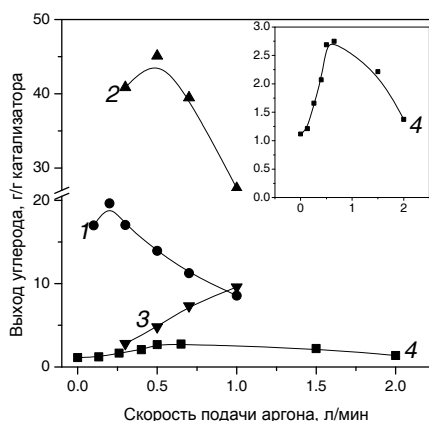


Рис. 2. Зависимость выхода углерода от скорости подачи аргона: 1 – система пропан-бутан катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 – система ацетон катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – система этанол катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4 – система этанол катализатор Ni/MgO

Зависимости представленные кривыми 1 (рис. 2 и 3) получена при постоянной скорости подачи пропан-бутана 0,2 л/мин, время синтеза 30 мин. Видно, что для системы пропан-бутан – катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 2, кривая 1) с увеличением скорости подачи аргона выход углерода падает, а на начальном участке наблюдается максимум выхода. Ранее подобная зависимость с резко выраженным максимумом наблюдалась нами для синтеза УНТ из неразбавленного пропан-бутана на катализаторе (Fe,Co,Mo)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [11]. Здесь и далее степень конверсия вещества-источника углерода рассчитана в % и является отношением массы полученных УНТ к массе химически связанного углерода пропущенного через реактор за время синтеза и умноженное на 100 %. Видно, что конверсия в данной системе относительно небольшая и, так же как и массовый выход УНТ, падает по мере увеличения скорости подачи аргона. Следует отметить, что в промышленном реакторе ООО НаноТехЦентр, г. Тамбов, где пропан-бутан не разбавляется аргоном, конверсия в оптимальных условиях составляет около 30 % от теоретической. Таким образом, данный параметр чувствителен к технологическим, а видимо и конструктивным параметрам. Было предположено, что такие зависимости выхода УНТ из пропан-бутана от скорости подачи компонентов газовой смеси в реактор вызваны участием в процессе проста УНТ промежуточных соединений, а именно, этилена и пропилена, образующихся при термических превращениях пропана и бутана [12, 13].

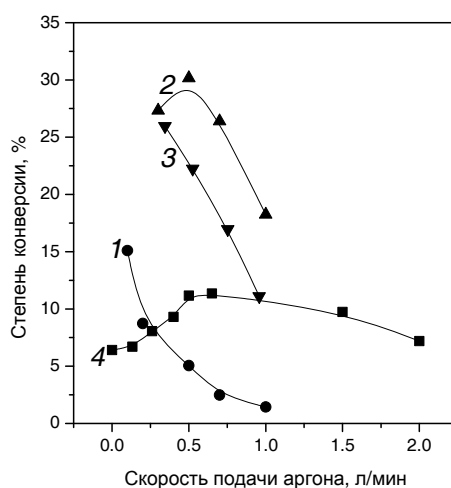
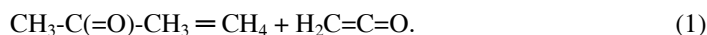


Рис. 3. Зависимость степени конверсии углеродсодержащих веществ в углерод (УНТ) от скорости подачи аргона: 1 – система пропан-бутан катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2. – система ацетон катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – система этанол катализатор (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4 – система этанол катализатор Ni/MgO

Кривые 2 (рис. 2 и 3) получены при постоянной скорости подачи ацетона (жид.) 18,3 мл/час, время синтеза 30 мин. Как видно, массовый выход УНТ из ацетона при увеличении скорости подачи аргона проходит через максимум и снижается при дальнейшем увеличении скорости подачи газообразных компонентов, так же, как и при синтезе нанougлерода из пропан-бутана. При этом, по абсолютной величине степень конверсии углеродсодержащих веществ достаточно высокая, что показывает эффективность применения ацетона как исходного сырья для получения УНТ. Оптимальное сочетание массового выхода УНТ и конверсии ацетона наблюдается в интервале скорости подачи аргона 0,4–0,6 л/мин.

По-видимому, в случае ацетона также имеет место участие промежуточных продуктов термических превращений ацетона в процессе синтеза УНТ. Термический распад ацетона принципиально отличается от превращений спиртов и алканов. При 500–700 °С из ацетона с выходом до 80 % получается кетен [14, 15]:



Можно предположить, что кетен и является промежуточным соединением, участвующим в процессе роста УНТ в данной системе. Вместе с тем, падение массового выхода УНТ и конверсии с увеличением скорости подачи аргона в системе с ацетоном выражены слабее, чем в случае пропан-бутана. Не исключено, что молекулы исходного ацетона также способны участвовать в процессе роста УНТ наряду с кетеном.

Другой характер зависимостей выхода углерода (УНТ) и конверсии вещества-источника углерода в углерод от скорости подачи аргона наблюдается при получении УНТ из этанола на катализаторе (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 2, 3, кривые 3). В данных системах выход монотонно растет, а степень конверсии монотонно падает при увеличении скорости подачи аргона. Зависимости получены при скорости подачи этанола (жид.) 40 мл/час и аргона 1 л/мин.

Известно, что на кислых катализаторах (например, оксиде алюминия) при 300–400 °С этанол с высоким выходом дает этилен и воду. Продуктами высокотемпературного газофазного не каталитического пиролиза этанола, протекающего по свободно-радикальному механизму, являются метан, этан, водород, вода, формальдегид [16]. Относительный выход перечисленных продуктов при температуре синтеза УНТ и в присутствии катализаторов неизвестен. Исходя из того, что массовый выход углерода (УНТ) монотонно растет с увеличением скорости подачи аргона (при постоянном соотношении аргона и этанола), можно предположить, что в данной системе промежуточные продукты газофазных термических превращений этанола играют меньшую роль в процессе роста УНТ.

Несколько иначе ведет себя этанол в присутствии катализатора Ni/MgO. Зависимости удельного выхода и степени превращения от расхода аргона представлены кривыми 4 на рис. 2 и 3 (полученные при скорости подачи этанола (жид.) 20 мл/час, время синтеза 30 минут) имеют, как и в случаи получения УНТ на (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> из пропан-бутана и ацетона, экстремальный характер с ярко выраженным максимумом в диапазоне расхода аргона 0,45–0,75 л/мин.

Видно, что наиболее рациональным является выращивание УНТ из этанола на Ni/MgO катализаторе при разбавлении паров этилового спирта аргоном в диапазоне соотношений 1:4..7 масс..

Экстремальный характер зависимости выхода углерода и конверсии этанола при выращивании УНТ на Ni/MgO катализаторах, можно объяснить конкурирующим влиянием на процесс роста УНТ газообразных продуктов распада этилового спирта (этилен, ацетальдегид, метан, монооксид и диоксид углерода, вода) [17]. Как показали исследования, проводимые с использованием методов ИК-спектроскопии, разложение паров этанола в присутствии никелевого катализатора идет по схеме [18]:



В присутствии паров воды (порядка 4 % от объема этанола) возможны реакции с продуктами реакции (3) [19]:



Нужно учитывать, что выход реакции паровой конверсии метана по уравнению (5) незначительный, т.к. она реализуется в невыгодных условиях с точки зрения термодинамики процесса (оптимальный режим: температура 800–1000 °С и давление 2,0–3,0 МПа).

Ранее было показано, что углеродные частицы, полученные из пропан-бутана и ацетона на катализаторе (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, представляют собой многослойные нанотрубки диаметром около 10–20 нм и длиной до 5 мкм [1].

Исследование, проведенное методами просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии (ПЭМ и СЭМ) в Научно-образовательном и инновационном центре «Наноструктурные материалы и нанотехнологии» Белгородского государственного университета, показало, что углеродные наноматериалы, полученные из этанола на катализаторе Ni/MgO, имеют иную морфологию.

Изображения, полученные методами СЭМ, трех образцов УНТ полученных при скоростях подачи аргона 0; 0,65 и 2,00 л/мин представлены на рис. 4.

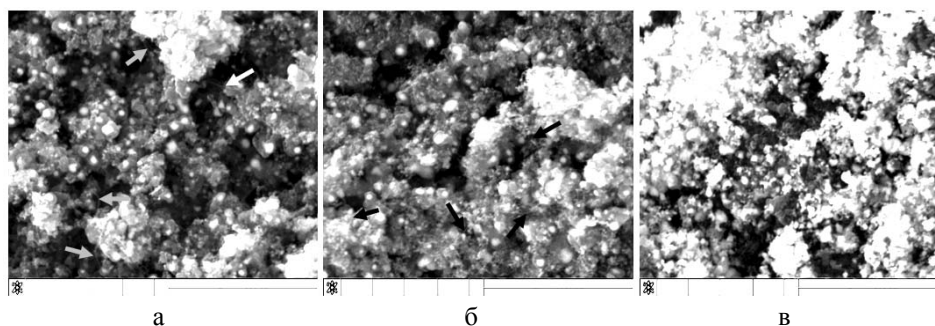


Рис. 4. СЭМ – изображения углеродного материала полученного из этанола на Ni/MgO катализаторе (масштабная линия 5 мкм, стрелками отмечены нитевидные структуры). Скорость подачи аргона: а – 0 л/мин; б – 0,65 л/мин; в – 2,00 л/мин

Как видно, углеродные нитевидные наноструктуры не обнаружены в образце, полученном при скорости подачи аргона 2 л/мин (рис. 4,в). При этом во всех образцах обнаружены глобоидальные частицы с переменной контрастностью.

Морфология углеродных наноструктур определялась методами ПЭМ. ПЭМ – изображения образца полученного при скорости потока аргона 0,65 мл/мин (соотношение этанол:аргон, 1:5 масс.) представлены на рис. 5. Изображения получены с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM 2000.

Видно, что выращенные углеродные нанообъекты представляют собой нитевидные образования с внешним диаметром 20–60 нм и полым внутренним каналом с диаметром 5–15 нм длиной до 2 мкм и глобоидальных частиц диаметром 30–300 нм. Как показал, химический анализ с участка представленного рис. 5,б, основными элементами являются углерод (41,01 % атом.), никель (51,22 % атом.), медь (материал подложки 6,05 % атом.), примеси железа, кобальта, хрома (менее 1,72 % атом.). Результаты химического анализа позволяют высказать предположение, что глобоидальные частицы являются частицами катализатора капсулированными в углероде, что также объясняет низкий выход УНТ.

Для процесса выращивания УНТ из этанола на Ni/MgO катализаторе с использованием макрокинетического подхода [20] выполнен теоретический расчет удельного выхода наноуглерода. Результаты расчета поставлены в сравнение с экспериментальными данными.

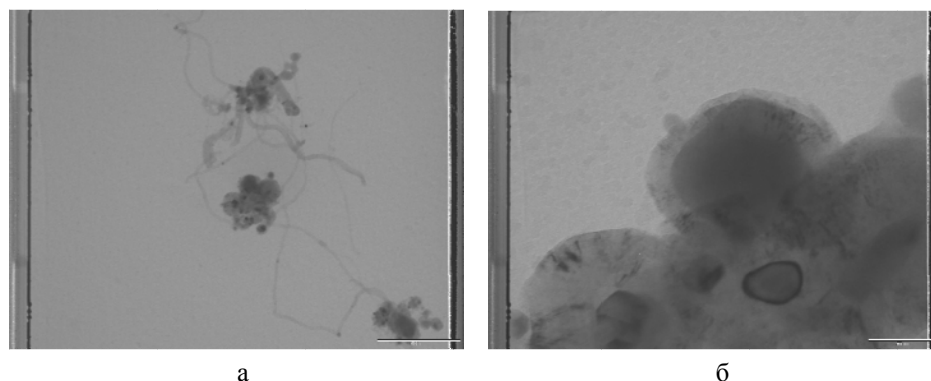


Рис. 5. ПЭМ – изображения материала полученного из этанола на Ni/MgO катализаторе. Скорость потока аргона 0,65 мл/мин (масштабная линия: а – 500 нм; б – 50 нм.)

Макрокинетический подход базируется на представлении, что в подавляющем количестве случаев лимитирующей стадией получения углеродного материала является внешняя массоотдача от газового потока к поверхности катализатора и соответственно кинетика внешней диффузии определяет кинетику формирования углеродных наноструктур. При этом нужно отдать отчет, что макрокинетический подход является средством не позволяющим объяснить механизмы формирования углеродных наноструктур, а только описать количественные характеристики (масса УНТ, удельный выход, конверсия углеродсодержащих веществ и др.) процесса при известных кинетических параметрах (коэффициент эффективной массоотдачи и коэффициент активности поверхности катализатора, точнее характер его изменения от выхода углерода) полученных экспериментально или теоретически.

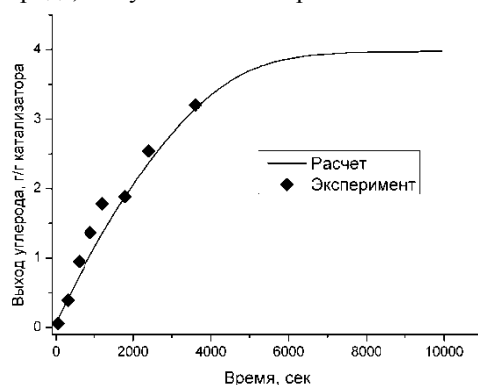


Рис. 6. Результаты расчета кинетики (выхода) синтеза УНТ из этанола на Ni/MgO катализаторе в сравнение с экспериментальными данными (расчет выполнен с использованием макрокинетической модели)

Коэффициент эффективной массоотдачи  $[\beta]$  углеродсодержащего газа (в пересчете на атомарный углерод) от потока к поверхности катализатора, а точнее лобовой поверхности (в рамках терминологии [21]), размерность м/с, но при выполнении практических расчетов кинетики процессов синтеза УНТ удобнее использовать концентрацию в потоке кг углерода/кг смеси, и соответственно размерность имеет вид  $[\beta'] = \text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ . Коэффициент активности поверхности катали-

затора  $k_{Fm}$  численно равный доле поверхности, участвующей в процессе синтеза УНТ по отношению к первоначальной. Использование коэффициент активности поверхности катализатора является допустимо простым способом описания склонности катализаторов синтеза УНТ к дезактивации.

Для выполнения расчета разработан программный код на алгоритмическом языке Pascal с использованием продукта Free Pascal (Copyright © 1998 – 2005 by BBrczi Gabor, Pierre Muller and Peter Vreman).

Исходные данные для расчета кинетики процесса выращивания УНТ из этанола на Ni/MgO катализаторе представлены в табл. 1

Характер изменения коэффициента активности поверхности катализатора, полученный экспериментально, имеет не линейный вид и определяется уравнением:

$$k_{Fm} = 1,1 - 0,0623 \cdot K_y^2 + 0,064 \cdot K_y^3 - 0,1 \exp(K_y). \quad (7)$$

Результаты сравнения расчета с экспериментальными данными представлены на рис. 6. Как видно, расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 5 %.

Таблица 1

**Исходные данные для расчета кинетики синтеза УНТ на Ni/MgO**

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Длина подложки	$l$	м	0,15
Ширина подложки	$b$	м	0,01
Масса катализатора	$m_{kt}$	г	0,05
Массовый расход исходной смеси	$G_0$	кг/с	$2,238 \cdot 10^{-5}$
Рассматриваемый интервал времени	$\tau_r$	с	0–9000
Начальная доля связанного углерода в исходной смеси	$X_C$	%	10,43
Средний радиус каталитической частицы	$r_{kt}$	нм	20
Насыпная плотность катализатора	$\rho_{kt}$	кг/м <sup>3</sup>	650
Внутренний диаметр реактора	$R$	м	0,037
Коэффициент эффективной массоотдачи	$\beta'$	кг/(с·м <sup>2</sup> )	0,045

**Выводы:**

1. Оптимальные (по массовому выходу) температуры синтеза углеродных наноматериалов составляют:

- ◆ УНТ из пропан-бутана на катализаторе (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 650 °С;
- ◆ УНТ из ацетона на катализаторе (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 700 °С;
- ◆ УНТ из этанола на катализаторе (Co,Mo)/MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 750 °С;
- ◆ УНТ из этанола на катализаторе Ni/MgO – 700 °С.

2. Зависимости массового выхода углеродных наноматериалов и конверсии веществ-источников углерода в наноуглерод от скорости подачи газообразных компонентов в реактор проходят через максимум или уменьшаются при увеличении скорости подачи газов, что связано с участием промежуточных продуктов термических превращений веществ-источников углерода в процессе роста УНТ.

3. Кинетика образования наноуглерода хорошо описывается макрокинетической моделью, учитывающей процессы диффузии и изменение активности катализатора во времени.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kumar Mukul, Ando Yoshinori*. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2010. – Vol. 10. – P. 3739-3758.
2. *Park C., Baker R.T.K.* Catalytic behavior of graphite nanofiber supported nickel particles // *Journal of Catalysis*. – 2000. – Vol. 190, № 1. – P. 104-117.
3. Раков Э.Г. Пиролитический синтез углеродных нанотрубок и нановолокон // *Российский химический журнал*. – 2004. – Т. 48, № 5. – С. 12-20.
4. *Nasibulin Albert G., Moissalal Anna, Jiang Hua, Kauppinen Esko I.* Carbon nanotube synthesis from alcohols by a novel aerosol method // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2006. – Vol. 8. – P. 465-475.
5. *Colomer J.-F., Stephan C., Lefrant S.* Large-scale synthesis of single-wall carbon nanotubes by catalytic chemical vapor deposition (CCVD) method // *Chemical Physics Letters*. – 2000. – Vol. 317. – P. 83-89.
6. *Altalhi Tariq, Ginic-Markovic Milena, Han Ninghui, Clarke Stephen, Losic Dusan.* Synthesis of Carbon Nanotube (CNT) Composite Membranes // *Membranes*. – 2011. – Vol. 1. – P. 37-47.
7. *Benito A.M., Maniette Y., Munoz E.* Carbon nanotubes production by catalytic pyrolysis of benzene // *Carbon*. – 1998. – Vol. 36, № 56. – P. 681-683.
8. *Ajayan P., Iijima S.* Controlled synthesis and metal-filling of aligned carbon nanotubes // *Nature*. – 1993. – Vol. 361. – P. 333-334.
9. *Dubey Prashant, Muthukumaran Devarajan, Dash Subhashis, Mukhopadhyay Rupa, Sarkar Sabyasachi.* Synthesis and characterization of water-soluble carbon nanotubes from mustard soot // *Pramana – J. Phys.* – 2005. – Vol. 65, № 4. – P. 681-697.
10. *Ткачев А.Г., Мищенко С.В., Коновалов В.И.* Каталитический синтез углеродных нанотрубок из газофазных продуктов пиролиза углеводородов // *Российские нанотехнологии*. – 2007. – Т. 2. – С. 100-108.
11. *Мележик А.В., Смыков М.А.* Влияние параметров технологических режимов на выращивание углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза углеводородов // *Вестник ТГТУ*. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 904-909.
12. *Мухина Т.Н., Баранов Н.Л., Бабаи С.Е. и др.* Пиролиз углеводородного сырья. – М.: Химия. 1987. – 240 с.
13. *Ямпольский Ю.П.* Элементарные реакции и механизм пиролиза углеводородов. – М.: Химия. 1990. – 216 с.
14. *Лейси Р.Н.* Кетен в органическом синтезе. В кн.: *Успехи органической химии: Пер. с англ.* Т. 2. – М., 1964. – 204 с.
15. *Физер Л., Физер М.* Реагенты для органического синтеза: Пер. с англ. / Под ред. Кнушнянца И.Л. и Костяновского Р.Г. Т. 2. – М.: Мир. 1970. – 125 с.
16. *Montoro L.A., Corio P., Rosolen J.M.* A comparative study of alcohols and ketones as carbon precursor for multi-walled carbon nanotube growth // *Carbon*. – 2007. – Vol. 45. – P. 1234-1241.
17. *Бобринецкий И.И., Неволин В.К., Симулин М.М.* Технология производства углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза из газовой фазы этанола // *Химическая технология*. – 2007. – № 2. – С. 58-62.
18. *Редькин А.Н., Кипин В.А., Маляревич Л.В.* Синтеза углеродных волокнистых наноматериалов из паров этанола на никелевом катализаторе // *Неорган. Материалы*. – 2006. – Т. 42, № 3. – С. 284-287.
19. *Редькин А.Н., Кипин В.А.* Газофазный синтез углеродного нановолокнистого материалов из водно-спиртовых смесей // *Неорган. Материалы*. – 2009. – Т. 45, № 9. – С. 1057-1062.
20. *Рухов А.В.* Синтез углеродных наноматериалов в поле индуктора // *Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing*. – 2011. – 187 с.
21. *Чесноков В.В., Буянов Р.А.* Образование углеродных нитей при каталитическом разложении углеводородов на катализаторах подгруппы железа и их сплавах // *Успехи химии*. – 2000. – № 69. – С. 675-692.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор О.А. Агеев.

**Мележик Александр Васильевич** – Тамбовский государственный технический университет; e-mail: nanocarbon@rambler.ru; 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106; тел.: 84752635522; +79622350659; к.х.н.; доцент.

**Рухов Артем Викторович** – e-mail: artem1@inbox.ru; тел.: 84752635522; +79202381265; к.т.н.

**Туголуков Евгений Николаевич** – e-mail: tugolukov.en@mail.ru; тел.: 84752635522; д.т.н.; профессор.

**Бычков Олег Николаевич** – e-mail: bickoba68@yandex.ru; тел.: 84752635522; магистрант.

**Котельников Сергей Александрович** – e-mail: serega18lion@mail.ru; тел.: 84752635522; магистрант.

**Ткачев Алексей Григорьевич** – e-mail: nanotam@yandex.ru; тел.: 84752635522; д.т.н.; профессор.

**Melezhik Aleksander Vasilevich** – Tambov State Technical University; e-mail: nanocarbon@rambler.ru; 106, Sovetskaya street, Tambov, 392000, Russia; phone: +74752635522; +79622350659; cand. of chem. sc.; associate professor.

**Rukhov Artem Viktorovich** – e-mail: artem1@inbox.ru; phone: +74752635522; +79202381265; cand. of eng. sc.

**Tugolukov Evgeniy Nikolaevich** – e-mail: tugolukov.en@mail.ru; phone: 84752635522; dr. of eng. sc.

**Bychkov Oleg Nikolaevich** – e-mail: bickoba68@yandex.ru; phone: +74752635522; magister.

**Kotelnikov Sergey Aleksandrovich** – e-mail: serega18lion@mail.ru; phone: +74752635522; magister

**Tkachev Aleksey Grigorevich** – e-mail: nanotam@yandex.ru; phone: +74752635522; dr. of eng. sc.; professor.