

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертацию Трофименко Евгения
Александровича на тему «Разработка технологии ускоренной
стабилизации
ПАН жгута для получения высокопрочных углеродных волокон»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.6.12. Химическая технология топлива и
высокоэнергетических веществ

Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что композиты на основе углеродных волокон находят все более широкое применение не только в авиации и космосе, но и в более массовых направлениях, таких как строительство, автомобильный транспорт, нефтегазовая отрасль. В то же время в данных направлениях широкое применение композитов на основе углеродных волокон еще достаточно ограничено, что обусловлено в первую очередь их относительно высокой ценой. Снижение себестоимости углеродного волокна и должно привести к расширению областей использования композитов в массовом секторе экономики. Работа, направленная на сокращение продолжительности цикла получения углеродного волокна из ПАН прекурсора при одновременном снижении его энергоемкости, востребована и своевременна.

Новизна и практическая значимость проведенных исследований и полученных результатов. В работе предложен и экспериментально обоснован подход к разделению процессов термостабилизации на стадии без участия и с участием окислителя. На базе исследования кинетики термодеструкции ПАН-волокон выбран оптимизированный режим обработки исходного материала. Впервые представлено развернутое описание процесса проведения термостабилизации ПАН-волокна, позволяющего в три раза повысить производительность получения углеродного волокна с заданными физико-механическими характеристиками.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований опубликованы и апробированы в 5 статьях в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Chemical Abstracts. Результаты работы представлены в виде докладов в материалах 5 всероссийских и международных конференций и симпозиумов, получен 1 патент РФ.

Анализ содержания диссертационной работы

Представленная к защите диссертация имеет традиционную структуру и состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературных источников, 2 приложений. Текст диссертации представлен на 151 странице и включает в себя 51 рисунок, 3 таблицы и список литературных источников, включающий 65 позиций.

Во введении отражены актуальность и степень разработанности темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, обозначены научная новизна и практическая значимость. Также приведены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору по теме исследования. Описаны основные технологические стадии получения углеродных волокон начиная от синтеза до финальной термообработки. Обзор написан хорошим литературным языком, легко читается и дает достаточно полное представление о свойствах и стадиях получения исследуемых материалов. Особый акцент сделан на параметрах, влияющих на качество и производительность технологических процессов получения углеродного волокна. Литературный обзор завершается выводами.

Во второй главе описаны объекты и методы исследования, среди которых испытания плотности, термического анализа, прочности волокон в микропластике, оптической микроскопии и т.д. Следует отметить высокий уровень исполнения и обеспеченности средствами технологического контроля использованных стендовых установок.

Третья глава посвящена проведению экспериментов по установлению влияния параметров процесса термостабилизации на свойства

термостабилизированных и финальных углеродных волокон. Хотелось бы отметить четкое планирование экспериментов в условиях многофакторности исследуемых технологических процессов и обоснованной модификации предлагаемых технических решений.

Проведен ряд экспериментов по определению влияния различных технологических решений (начальная инициация, изменение режимов обработки, интенсивности потоков воздуха, оптимизации деформационной вытяжки) на свойства термостабилизированных и результирующие свойства углеродных волокон. Проверен ряд гипотез и определен оптимальный режим обработки, приводящий к существенному сокращению времени термостабилизации, что является крайне важным результатом с технико-экономической точки зрения.

Установлено, что двухстадийная обработка с разделением процессов сокращает время обработки в 3 раза. Хотел бы особенно отметить, что в работе анализируется реализуемость процесса не только с точки зрения свойств конечного продукта, но и с точки зрения технологичности и безопасности его применения на производстве. Таким образом, данная работа имеет высокую практическую значимость, дополнительно подтвержденную прилагаемыми заключениями и протоколами.

Изложенная выше высокая оценка работы отнюдь не означает, что она идеальна и лишена каких-либо недостатков. Основные замечания и требующие дополнительного прояснения вопросы приведены ниже.

1. На стр. 85-86 описан эксперимент по отбору и последующей карбонизации образцов термостабилизированных волокон, отобранных с разных зон термостабилизации и полученных с убыванием плотности. По результатам испытаний сделан ряд заключений, в частности «2. Стабилизация волокна до большей объемной плотности приводит к возрастанию линейной плотности и снижению объемной плотности, что может быть следствием конденсации на поверхности волокна в виде сажи продуктов термической

деструкции недостаточно стабилизированного полимера». Необходимо пояснить, на основании каких данных сделаны данные выводы, в частности вывод о конденсации сажи, поскольку сравнение качества и внешнего вида не приведено, а механические характеристики являются сопоставимыми.

2. На страницах 100 и 101 приведена линейная аппроксимация степени превращения и определены константы уравнения Аррениуса. В то же время параметры аппроксимации и погрешности определения характеристик не приведены. Также следует указать какие погрешности определяемых параметров достигнуты при различных анализах.

3. Не совсем ясна трактовка результатов по начальной инициации на воздухе, признанная неудачной. В таблице 22 приведены результаты с достаточно высокой (более 4 ГПа) прочностью углеродных волокон, но к недостаткам отнесена пониженная на $\sim 10\%$ линейная плотность и неравномерность волокна по сечению. В таблице 27 по итогам эксперимента 7, признанного приемлемым также получается неоднородное волокно, в режиме 1 результирующие характеристики УВ даже уступают экспериментам 5-6, а высокие характеристики в режиме 2 получены оптимизацией деформации. Не может ли быть достигнут аналогичный результат для процесса с начальной инициацией за счёт аналогичной оптимизации деформации?

4. В работе большое внимание уделяется контролю неоднородности волокна по сечению и технологичности волокна (наличие ворса, склеиваемости). При этом нет визуально-графического представления параметров технологичности. Также не ясно, удалось ли установить корреляцию между равномерностью сечения получаемого термостабилизированного волокна и технологичностью переработки?

5. На стр. 136 описан эксперимент по термостабилизации на промышленной линии и эксперимент признан успешным. В то же время результирующие характеристики свойств получаемого углеродного волокна не приведены. Возможно ли приведение этих значений в сравнении с

предыдущими экспериментами и можно ли по ним судить о корректности масштабирования технологического процесса с точки зрения свойств получаемых углеродных волокон?

6. Литературный обзор содержит очень подробное описание всей технологии получения углеродного волокна, при этом работа посвящена только процессу термостабилизации, которому в обзоре уделено внимание в равной степени с остальными операциями. Полагаю, что процесс термостабилизации следовало бы описать в обзоре преимущественно и в большем объеме.

7. В работе есть опечатки и пропуски, ошибки в названиях торговых марок и названий компаний, различия в единицах измерения в таблицах и рисунках (Вт/г и мВт/мг, г/см³ и кг/м³), обозначения на английском языке.

Отмеченные замечания не являются критическими и не умаляют достоинств работы. Общий высокий уровень диссертации не вызывает сомнений. Основные результаты работы и сформулированные автором на их основании выводы вполне обоснованы, их высокий научный уровень подтверждают публикации в рецензируемых журналах и апробация на научных конференциях

Диссертационная работа Е.А. Трофименко является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании экспериментальных и теоретических исследований предложено эффективное решение актуальной проблемы снижения времени термостабилизации полиакрилонитрильного волокна с использованием двухстадийной схемы обработки, и определены параметры проведения процесса.

Тема диссертационной работы, ее основные научные положения, результаты и выводы полностью соответствуют паспорту специальности 2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ. Автореферат соответствует структуре и содержанию диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном

образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и.о. ректора №103ОД от 14.09.2023 г. (с последующими редакциями), а её автор Трофименко Е.А. заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ.

Официальный оппонент:

кандидат химических наук,
ведущий научный сотрудник кафедры химической технологии и новых материалов химического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Малахо Артем Петрович

«19» 03 2026 г.

Контактные данные:

тел.: +7(495)9393592,

e-mail: m ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 02.00.01 - Неорганическая химия, 02.00.21 – Химия твердого тела

Адрес места работы:

119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 3, ГСП-1, МГУ,
химический факультет

Телефон: +7(495) 939 3571, e-mail: dekanat@chem.msu.ru

Личную подпись *Малахо А.П.*
ЗАВЕРЯЮ: *Капустина Т.А.*
зам.нач. отдела делопроизводства
химического факультета МГУ