

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на диссертацию Воробьевой Екатерины Андреевны

«Анизотропия тепловых и электрофизических свойств углеродных нанотрубок и полимерных композитов с их включением»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.15 –

«Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика»

Диссертация «Анизотропия тепловых и электрофизических свойств углеродных нанотрубок и полимерных композитов с их включением» выполнена Е.А. Воробьевой в отделе Физики атомного ядра Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова.

Будучи студенткой 2-го курса физического факультета МГУ Воробьева подключилась к проводимым в ОФАЯ разработкам методов синтеза углеродных наноструктур и исследованиям их свойств и продолжила работу в этом направлении после зачисления на кафедру физики космоса физического факультета на 3-ем курсе. По различным аспектам данной темы Е.А. Воробьева подготовила и защитила все полагающиеся по учебному плану курсовые и дипломную работы. В 2012 г. Е.А. Воробьева с отличием закончила физический факультет МГУ и поступила на работу в ОФАЯ НИИЯФ МГУ, где и продолжает работать в настоящее время в должности научного сотрудника.

За время учебы на физическом факультете МГУ и работы в НИИЯФ МГУ Е.А. Воробьева стала одной из ключевых разработчиков ряда методик синтеза углеродных нанотрубок (УНТ). В частности, Е.А. Воробьева внесла значительный вклад в создание установки по пиролитическому газофазному осаждению (ПГО) УНТ, разработку и оптимизацию метода ПГО. При её активном участии лаборатория проделала большой путь от синтеза методом ПГО УНТ-содержащего состава с достаточно большим содержанием аморфной массы до методики осаждения с практически 100%-ным содержанием многостенных УНТ, и далее до осаждения т.н. «леса» вертикально ориентированных УНТ.

В диссертационной работе Е.А. Воробьева представила ряд полученных ею новых результатов. В частности, Е.А. Воробьевой впервые экспериментально установлено, что нанокластеры катализатора Fe, инкапсулированные в центральном канале многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), имеют моноклинную искаженную гранецентрированную решетку, соответствующую деформированной гамма-фазе железа, с моноклинной деформацией кубической симметрии с осями  $c > a = b$  и с квадратной базой, трансформированной в ромбическую. Впервые экспериментально установлено, что соседние слои в многостенных углеродных нанотрубках не являются структурно когерентными, хиральный угол в соседних слоях различается. Впервые получены структуры микротрубок, состоящих из углеродных нанотрубок.

Е.А. Воробьевой показано, что использование ориентированных определенным образом МУНТ в полимерных композитах позволяет существенно (на 10 – 12 порядков) увеличить их электропроводность (до  $0,85 \text{ 1}/(\text{Ом}\cdot\text{см})$ ), тем самым переводя материал из разряда диэлектриков в разряд проводников. Показано, что теплопроводность эпоксидной смолы с ориентированными МУНТ (16,7% по объему) в 19 раз превышает теплопроводность исходной эпоксидной смолы, а также превышает теплопроводность эпоксидной смолы с неориентированными УНТ. В диссертационной работе представлены результаты компьютерного моделирования динамики распространения тепла в композите с ориентированными нанотрубками. Моделирование показало важность контактного теплосопротивления на границе МУНТ-матрица полимера. Функционализация УНТ позволяет снизить контактное сопротивление.

Личный вклад Е.А. Воробьевой в изложенные в диссертации результаты заключается в разработке ряда методик синтеза МУНТ, в частности, в создании установки по пиролитическому газофазному осаждению (ПГО) МУНТ, в разработке и оптимизации метода ПГО. Более 500 экспериментов по синтезу углеродных наноструктур было проведено Е.А. Воробьевой при выполнении диссертационной работы. Е.А. Воробьева активно участвовала в исследовании структуры углеродных нанотрубок с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, в

исследовании структуры слоев МУНТ, а также структуры частиц катализатора, инкапсулированных в центральном канале МУНТ.

Разработанные Е.А. Воробьевой технологии синтеза нанокompозитов активно используются для получения бориентрированных массивов МУНТ, имеют хорошие перспективы для создания газовых сенсоров и других нанотехнологических устройств на основе МУНТ, а также для создания полимерных композитов, наполненных МУНТ, с заданными электро- и теплофизическими, прочностными свойствами, что является актуальным для многих приложений – от защитных покрытий до электроники.

Диссертационная работа Е.А. Воробьевой апробирована, результаты докладывались на 29 конференциях, из них 18 международных и 11 всероссийских, и опубликованы в 31 научной работе, в том числе 11 публикациях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 01.04.15. Получен патент.

Рекомендую диссертацию Екатерины Андреевны Воробьевой «Анизотропия тепловых и электрофизических свойств углеродных нанотрубок и полимерных композитов с их включением» к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.15 – «Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика».

Научный руководитель

заведующий отделом физики атомного ядра НИИЯФ МГУ

доктор физико-математических наук, профессор

Н.Г. Чеченин

Подпись Н.Г. Чеченина заверяю

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ,

кандидат физико-математических наук



Е.А. Сигаева