



## RESEARCH DEDICATED TO THE PROCEDURE OF OBTAINING OF WOODEN COAL USING THE PYROLYSIS UNDER PRESURE

Sergey VASILEVICH<sup>1</sup>, Mihail MALKO<sup>1</sup>, Vladimir BOGACH<sup>1</sup>, Dmitriy  
DEGTEROV<sup>1</sup>, Andrey Asadchy<sup>1</sup>, Sofia GUSAKOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>State University of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**Abstract** - The results of the experimental research of the pyrolysis of birch chips, performed in laboratory reactor under the pressures of 0,1; 0,3; 0,5 u 0,7 MPa and of the speed of the heating of 1 °C/min have been described in the paper. The initial moisture of chips was 14,2% of weight and sizes of 17x8x6 mm. It has been found that increasing of the pressure from 0,1 MPa to 0,7 MPa increases the obtainment of wooden coal from 25,1% to 32,4% of weight (related to the dry mass of original material) and the composition of the coal from 89,1% of weight at 0,1 MPa to 96,4% of weight to 0,7MPa. The calorific value of the wooden coal decreases from 34,86 MG/kg at the pressure of 0,1 MPa to 30,23 MG/kg at the pressure of 0,7MPa.

**Keywords:** pyrolysis, birch chips, pressure, wooden coal.

## CERCETĂRI DEDICATE PROCESULUI DE OBȚINERE A CĂRBUNELUI DE LEMN PRIN PIROLIZĂ LA PRESIUNE

Serghei VASILEVICI<sup>1</sup>, Mihail MALIKO<sup>1</sup>, Vladimir BOGACI<sup>1</sup>, Dmitrii DEGTEROV<sup>1</sup>, Andrei  
Asadchi<sup>1</sup>, Sofia GUSAKOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institutul de Energetică al Academiei naționale de științe din Belarus  
Minsk, Republica Belarus

<sup>2</sup> Universitatea de Stat din Belarus, Minsk, Republica Belarus

**Rezumat** – În lucrare sunt dezvăluite rezultatele cercetării experimentale a pirolizei așchiilor de mesteacăn, realizată în reactorul de laborator la presiunile 0,1; 0,3; 0,5 u 0,7 MPa și a vitezei de încălzire de ordinul 1 °C/min. Umiditatea inițială a așchiilor constituia 14,2% din greutate, dar mărimile 17x8x6 mm. S-a stabilit, că ridicarea presiunii de la 0,1 MPa până la 0,7 MPa sporește obținerea cărbunelui de lemn de la 25,1% până la 32,4 din greutate (în raport cu masa uscată a materiei inițiale) și componența cărbunelui de la 89,1% din greutate, la 0,1 MPa până la 96,4% din greutate până la 0,7 MPa. Capacitatea termică a cărbunelui de lemn se reduce de la 34,86 MG/kg la presiunea de 0,1 MPa până la 30,23 MG/kg la presiunea de 0,7 MPa.

**Cuvinte cheie:** piroliză, așchii de mesteacăn, presiune, cărbune de lemn.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ ПУТЕМ ПИРОЛИЗА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

С.В. Василевич<sup>1</sup>, М.В. Малько<sup>1</sup>, В.Н.Богач<sup>1</sup>, Д.В. Дегтеров<sup>1</sup>, А.Н. Асадчий<sup>1</sup>,  
С.В. Гусакова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

**Реферат** – В работе обсуждаются результаты экспериментального исследования пиrolиза березовой щепы, выполненного на лабораторном реакторе при давлениях 0,1; 0,3; 0,5 и 0,7 МПа и скорости нагрева порядка 1 °C/мин. Исходная влажность щепы составляла 14,2% вес, а размеры - 17x8x6 мм. Установлено, что повышение давления от 0,1 МПа до 0,7 МПа повышает выход древесного угля от 25,1 до 32,4 % вес (по отношению к сухой массе исходного вещества) и содержание углерода от 89,1% вес. при 0,1 МПа до 96,4% вес при 0,7 МПа. Теплотворная способность древесного угля при этом снижается от 34,86 МДж/кг при давлении 0,1 МПа до 30,23 МДж/кг при давлении 0,7 МПа.

**Ключевые слова:** пиrolиз, березовая щепа, давление, древесный уголь.

## ВВЕДЕНИЕ

Древесный уголь – твердый пористый продукт пиролиза (термохимическая конверсия древесины при отсутствии окисляющего агента), образующийся наряду с жидкими продуктами (смолами) и горючими газами [1].

Этот продукт имеет разнообразное применение [1-3]. Он используется в качестве топлива в домашнем хозяйстве и производстве железа и стали, при получении ряда других металлов, а также технического кремния и материалов для электродов, для производства углеродных сорбентов, используемых для адсорбционной очистки и разделения сложных и жидких смесей, а также для решения иных задач.

Выход и качество древесного угля и других продуктов пиролиза биомассы зависит от многих факторов и, в первую очередь, от природы исходного материала, его влажности, размеров пиролизуемых образцов, а также от условий проведения процесса термохимической конверсии (скорость нагрева, температура, давление, наличие добавок различных химических веществ и т.д.).

В настоящей работе дано описание предварительных результатов экспериментального исследования влияния давления на образование древесного угля в процессе пиролиза березовой щепы. Это исследование было проведено на лабораторном стенде Института энергетики Национальной академии наук Беларуси.

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД

Для исследования влияния давления на процесс пиролиза был разработан и сконструирован лабораторный стенд, основным элементом которого является лабораторный реактор. Схема реактора и общий вид стенда показаны на рис. 1.

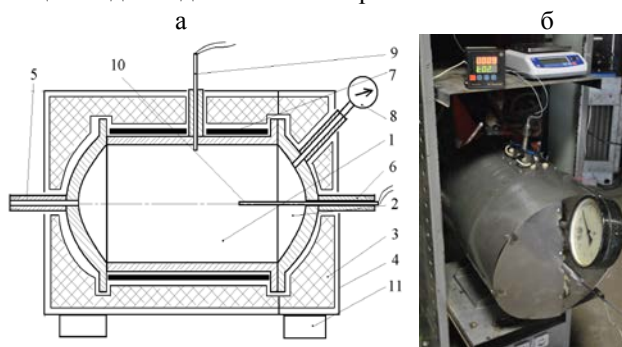


Рис. 1 – Лабораторный реактор: схема (а) и общий вид (б)

Основными элементами лабораторного реактора являются корпус 1, крышка 2, тепловая изоляция 3, кожух 4, штуцера 5-6, электрический нагреватель 7, манометр 8, термопары 9-10, опорные стойки 11.

Конструкция реактора позволяет проводить пиролиз биомассы как при атмосферном, так и при избыточном давлении. Для этого штуцер 5 заглушали, а к штуцеру 6 вместо термопары 10 крепили регулируемый предохранительный клапан, срабатывающий при давлении 0,3 – 0,7 МПа.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальное исследование влияния давления на процесс образования древесного угля в настоящей работе выполнено при давлениях 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 МПа. В каждом эксперименте исследования проводились по следующей методике. Примерно 4 кг исходного материала загружались в реактор, после чего включался электрический нагреватель, работающий на постоянной мощности, которая контролировалась на основе непрерывных замеров силы и напряжения подводимого электрического тока.

В качестве исходного сырья была использована березовая древесина в виде щепы размером частиц 17x8x6 мм. Влажность исходной древесины составляла 14,2% вес., плотность – 506,4 кг/м<sup>3</sup>, зольность – 0,23% вес.

Влажность древесины определялась с помощью влагомера ФАУНА-М (изготовитель ООО «Лента», РФ).

Температура в реакционной зоне измерялась с помощью термопары, помещаемой внутри слоя щепы.

Опыты при каждом давлении длились до установления постоянной температуры в зоне пиролиза, что достигалось в течение 600 минут (10 часов). Эта температура оказалась зависящей от давления, при котором происходил пиролиз березовой щепы. Так, в условиях опытов, проводимых при давлении 0,1 МПа, температура на плато составляла примерно 400°C. С ростом давления она повышалась и при давлении 0,7 МПа достигала около 550°C.

По окончании процесса пиролиза электронагреватель отключали и полученный древесный уголь охлаждался.

Как известно, в процессе пиролиза биомассы происходит выделение парообразных и газообразных продуктов, и, вследствие этого, происходит повышение давления в случае замкнутого объема. Для обеспечения постоянного давления в реакторе в опытах при давлении 0,1 МПа осуществлялся непрерывный отвод таких продуктов из реакционной зоны. В опытах, выполненных при других давлениях, газообразные компоненты выводились через штуцер 6, к которому крепился клапан, предварительно отрегулированный на определенное давление (0,3 МПа, 0,5 МПа и 0,7 МПа).

В соответствии с выполненными измерениями количество энергии, затраченной на пиролиз при различных давлениях, оказалось одинаковым и составило 34,89 МДж.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внешний вид древесного угля, полученного в обсуждаемых экспериментах, представлен на рис. 2.



Рис. 2 – Древесный уголь, полученный в опытах по пиролизу березовой щепы.

Как следует из рассмотрения рис. 2, образовавшийся древесный уголь имеет блестящую черную окраску и в основном сохраняет исходную форму. Вместе с тем наблюдается незначительное количество деформированных образцов. Причиной этой деформации является растрескивание вследствие выхода паров воды и газообразных продуктов пиролиза.

На рис. 3 и 4 показаны температурные зависимости пиролиза березовой щепы при давлениях 0,1 и 0,7 МПа соответственно.

Как следует из сравнения данных, представленных на этих рисунках, давление оказывает существенное влияние на ход процесса пиролиза. Так, в случае пиролиза березовой щепы при нормальном давлении, на протяжении примерно 500 минут происходило непрерывное повышение температуры с практически постоянной скоростью и с выходом на плато в районе 400°C.

Характер роста температуры существенно изменялся при более высоких давлениях. Как можно видеть из рис. 3 в случае пиролиза при давлении 0,7 МПа, просматриваются 3 различные зоны на кривой зависимости температуры от времени пребывания пиролизуемого материала в реакционной зоне. Они расположены в областях температуры от комнатной до примерно 200°C, от 200 до 500°C и от 500 до 600°C.

Другой особенностью пиролиза щепы при давлении 0,7 МПа является то, что выход на плато завершается при температуре порядка 600 °С, что на 200 градусов превышает температуру соответствующего участка при давлении 0,1 МПа.

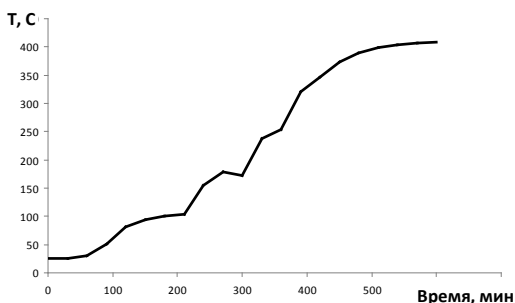


Рис. 3 – Изменение температуры в слое щепы, пиролизуемой при давлении 0,1 МПа

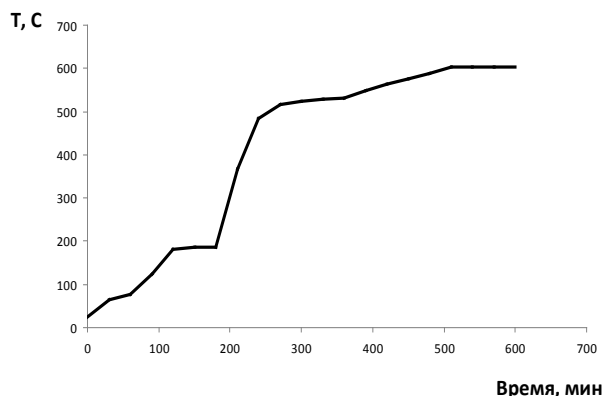


Рис. 4 – Изменение температуры в слое щепы, пиролизуемой при давлении 0,7 МПа.

Отмеченный сдвиг температурной зависимости наблюдается и при других изученных давлениях. При этом рост температур платообразного участка практически пропорционален давлению, при котором осуществлялся пиролиз. Это видно из таблицы 1, в которой приведены температуры платообразных участков в зависимости от давления.

Таблица 1 – Температуры платообразных участков пиролиза березовой щепы.

Давление, МПа	0,1	0,3	0,5	0,7
Т, °С	409	556	570	604

Одна из причин, объясняющих данный рост температур следующая. Как отмечалось выше, заданный уровень давления пиролиза в обсуждаемой работе осуществлялся путем вывода парообразных и газообразных компонентов из реактора. Максимальный вывод таких компонентов имел место при давлении 0,1 МПа, а минимальный – при давлении 0,7 МПа.

Вывод парообразных и газообразных продуктов из реактора обуславливал потерю тепловой энергии, а, следовательно, снижение температуры пиролизуемого материала. Это снижение было максимальным при давлении 0,1 МПа и минимальным при давлении 0,7 МПа. Соответственно, минимальная температура платообразного участка устанавливалась при давлении 0,1 МПа, а максимальная – при давлении 0,7 МПа.

Таким образом, методика проведения экспериментов, принятая в настоящей работе, при переходе в область более высоких давлений обусловила смещение пиролиза березовой щепы в область более высоких температур.

Такое смещение оказало существенное влияние на выход древесного угля и его свойства.

В таблице 2 представлена зависимость массового выхода древесного угля,  $X_c$ , по отношению к сухой массе образца от давления в реакторе.

Значение величины  $X_c$  определялось по формуле:

$$X_c = \frac{M_c \cdot 100}{M_0 \cdot (1 - \frac{W}{100})}$$

где  $M_c$  – масса угля, г;  $M_0$  – масса исходного сырья, г;  $W$  – влажность исходного сырья, %.

Согласно данным, представленным в таблице 2, повышение давления, при котором осуществлялся пиролиз березовой щепы, от 0,1 до 0,7 МПа приводит к увеличению выхода древесного угля в расчете на сухой вес от примерно 25% вес. при давлении 0,1 МПа до примерно 32% вес. при давлении 0,7 МПа.

Таблица 2 – Массовый выход древесного угля при различных давлениях в реакторе

Давление, МПа	0,1	0,3	0,5	0,7
$X_c$ , %	25,11	28,68	31,96	32,40

На рис. 5 представлено сравнение значений массового выхода древесного угля, установленных в настоящей работе, и авторами [4].

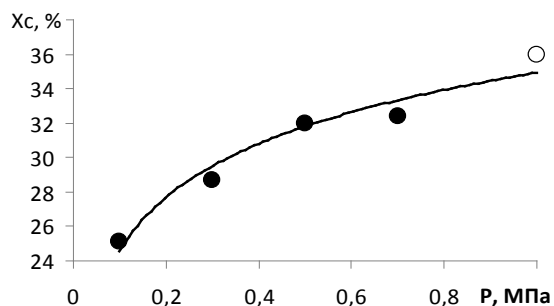


Рис. 5 – Зависимость массового выхода древесного угля от давления в реакторе: темные символы – данные, полученные в настоящей работе, светлый символ – результат, установленный в опытах по пиролизу биомассы при давлении 1 МПа специалистами Гавайского университета (США) [4].

Данные, представленные на последнем рисунке, свидетельствуют о наличии согласия между результатами, установленными в настоящей работе, и результатами американских исследователей [4], что является аргументом в пользу вывода о надежности экспериментальных результатов, установленных в настоящей работе.

В таблице 3 приведены значения теплотворной способности древесного угля, полученного при различных давлениях. Теплотворная способность определялась с помощью калориметра В-08МА «К».

Таблица 3 – Теплотворная способность древесного угля в зависимости от давления в реакторе

Давление, МПа	0,1	0,3	0,5	0,7
Qс, МДж/кг	34,86	33,69	31,04	30,23

Из таблицы 3 видно, что с увеличением давления в реакторе теплотворная способность получаемого древесного угля уменьшается. Этот эффект объясняется различием количества смолы, адсорбированной древесным углем. На это указывают данные наших исследований элементного анализа древесного угля, образовавшегося при различных давлениях. Согласно установленным данным, с ростом давления от 0,1 МПа до 0,7 МПа содержания кислорода в древесном угле снижается от 8,4 % вес. до 2,9 % вес. При этом содержание углерода повышается от 89,1 % вес. до 96,4 % вес.

Элементный состав определялся методом рентгеноспектрального микроанализа с помощью энергодисперсионного анализатора Oxford Instruments X-MaxN, работающего совместно с растровым электронным микроскопом LEO1455VP с чувствительностью 0,1 ат. %.

Как отмечалось выше, в случае проведения пиролиза березовой щепы при более высоких давлениях, выход температуры в слое щепы на платообразный участок достигается в области более высоких температур. Повышение температуры в слое щепы способствует протеканию процесса десорбции кислородосодержащих компонентов из пор образующегося древесного угля и к увеличению

содержания углерода в нем. При этом происходит приближение теплотворной способности образующегося древесного угля к теплотворной способности гумусовых углей на стадии метаморфозы IX-X, равной 33,9–33,5 МДж/кг [5].

Отмеченное выше изменение свойства древесного угля, происходящее при переходе в область более высоких давлений и температур, обусловлено особенностями пиролиза древесной массы. Согласно автору [6], суммарный процесс пиролиза древесины включает следующие стадии. При повышении температуры древесных образцов до примерно 160°C происходит практически полная потеря влаги (дегидратация). В области температур 200–280°C протекает процесс термического разложения гемицеллюлозы с образованием летучих продуктов (CO<sub>2</sub>, CO) и паров воды. В области температур 280–500°C разлагается целлюлоза с образованием также в основном летучих продуктов. При температуре выше 320°C происходит разложение лигнина. Последний процесс обуславливает существенный прирост углерода в остаточном твердом материале.

Первые 2 стадии суммарного процесса пиролиза древесины (потеря влаги и разложение гемицеллюлозы) являются эндотермическими процессами. В области температур выше 280°C происходит бурный распад древесины с выделением тепла, который в основном заканчивается при температуре выше 400°C.

В области более высоких температур происходит прокаливание угля. Это эндотермический процесс, в результате которого выделяется небольшое количество жидких продуктов и значительное количество газообразных продуктов. На стадии прокаливания угля [1] имеет место практически полное разложение кислородосодержащих продуктов, адсорбированных образовавшимся древесным углем. Снижение теплоты сгорания древесного угля при уменьшении количества кислородосодержащих компонентов указывает на то, что их теплотворная способность превышает теплотворную способность чистого углерода.

## ВЫВОДЫ

Экспериментальное исследование пиролиза березовой щепы на лабораторном стенде в области давлений от 0,1 до 0,7 МПа показало, что повышение давления, при котором осуществляется пиролиз, способствует росту массового выхода древесного угля и увеличению содержания углерода в нем. При этом происходит снижение теплотворной способности образующегося древесного угля, что обусловлено выходом из пористой структуры угля кислородосодержащих компонентов, обладающих более высокой теплотворной способностью по сравнению с чистым углеродом.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] *Технологии лесохимических производств*: Учебник для вузов/Выродов В.А., Кислицын А.Н.Б Глухарева М.И. и др.-М.: Лесная промышленность, 1987.-352 с.

- [2] M.J.Antal, Jr., M. Groenli. *The Art, Science, and Technology of Charcoal Production* // Ind. Eng. Chem. Res. 2003. Vol. 42. P. 1619-1640.
- [3] C. Felicano-Bruzual. *Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO2 reduction potential and economic prospects*//J. Mater. Res. Technol. 2014. Vol.3, No 3. P.233-243.
- [4] Yoshida T., Antal M.J. *Sewage Sludge Carbonization for Terra Preta Applications* / Energy Fuels, 2009. Vol. 23. — P. 5454–5459.
- [5] *Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленных органических и неорганических веществ ММШ*// под ред. Проконова Ю.В., Страхова В.И. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2002., С. 413.
- [6] A.F.Roberts. *Problems Associated with the Theoretical Analysis of the Burning of Wood*//Proceedings of the 16th Int. Symposium on Combustion. The Combustion Institute, Pitts.1971, P. 893-903.

## АВТОРЫ



**Первый автор:**  
Василевич Сергей Владимирович, 1982 года рождения. В 2004 г. окончил Белорусский государственный технологический университет по специальности лесоинженерное дело. В 2004 г. поступил в аспирантуру Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси по

специальности промышленная теплоэнергетика. До 2012 г. работал в должности научного сотрудника лаборатории дисперсных систем Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. Кандидат технических наук (2011 г. - защита диссертации). В настоящий момент работает заведующим лабораторией «Возобновляемая энергетика» ГП «Институт энергетика НАН Беларуси».



**Второй автор:**  
Малько Михаил Владимирович, 1942 года рождения. Ведущий научный сотрудник Института энергетика Национальной академии наук Беларуси. В 1960-1966 гг. учился на физическом факультете Белорусского государственного университета (г. Минск). После окончания учебы в университете работает в Национальной академии наук

Беларуси. В 1973 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси). Специалист в области возобновляемых источников энергии.



**Третий автор:**  
Богач Владимир Николаевич, 1988 года рождения. В 2010 г. окончил Белорусский государственный университет по специальности физика. В 2011 окончил магистратуру «Института подготовки научных кадров Национальной академии наук Беларуси» по специальности физика. В 2015 г. поступил в аспирантуру Института энергетика НАН.

Беларуси по специальности энергетические системы и комплексы. В настоящий момент работает научным сотрудником лаборатории «Возобновляемая энергетика» ГП «Институт энергетика НАН Беларуси». Специалист в области компьютерного моделирования и

экспериментального исследования процесса пиролиза биомассы; солнечной энергетики; наноплазмоники.



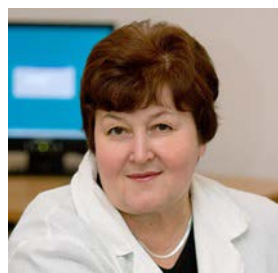
**Четвертый автор:**  
Дегтеров Дмитрий Валентинович, 1970 года рождения. В 1994 г. окончил Белорусский аграрный технический университет по специальности испытание сельскохозяйственной техники. В 1994-1997 гг. обучался в аспирантуре НИИ Механизации. До 2013 г. работал научным сотрудником лаборатории использования

топливно-энергетических ресурсов «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». В настоящий момент работает старшим научным сотрудником лаборатории «Возобновляемая энергетика» ГП «Институт энергетика НАН Беларуси». Специалист в области механизации сельского хозяйства, мелиорации, солнечной энергетики, возобновляемых источников энергии.



**Пятый автор:**  
Асадчий Андрей Николаевич, 1987 года рождения. В 2010 г. окончил Белорусский национальный технический университет по специальности технология материалов и компонентов электронной техники. До 2011 года работал в должности инженера в лаборатории дисперсных систем Института тепло- и массообмена имени

А.В. Лыкова НАН Беларуси. В 2011 окончил магистратуру «Института подготовки научных кадров Национальной академии наук Беларуси» по специальности физика. В 2015 г. поступил в аспирантуру Института энергетика НАН Беларуси по специальности энергетические системы и комплексы. В настоящий момент работает научным сотрудником лаборатории «Возобновляемая энергетика» ГП «Институт энергетика НАН Беларуси». Специалист в области экспериментальных исследований термохимических процессов. Имеет опыт разработки оборудования для термохимического разложения биомассы.



**Шестой автор:**  
Гусакова София Викторовна, 1952 года рождения. В 1974 г. окончила Белорусский государственный университет по специальности физика. С 1980 года работает на кафедре физики твердого тела Белорусского государственного университета в должности младшего научного сотрудника,

заведующего отделом обслуживания научных исследований. Кандидат физико-математических наук (2001 г. - защита диссертации). В настоящий момент работает ведущим инженером-технологом НИЛ физики ионно-плазменной модификации твердых тел.