

Наталья Владимировна Науменко

Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
декан факультета естествознания, Минск, Республика Беларусь
e-mail: nata-n15@mail.ru

Геннадий Викторович Котов

Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, кандидат химических наук, доцент, заведующий
межкафедральной научно-образовательной лабораторией биохимии и биотехнологии, Минск, Республика Беларусь
e-mail: kotovgv@mail.ru

Анна Николаевна Мурашкевич

Белорусский государственный технологический университет, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники, Минск, Республика Беларусь
e-mail: man@belstu.by

Алла Леонидовна Козлова-Козыревская

Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, кандидат химических наук, доцент,
заведующий кафедрой химии, Минск, Республика Беларусь
e-mail: kozyrevskaya@tut.by

Исследования в области синтеза наночастиц в студенческой научной лаборатории

Аннотация. В статье представлены сведения об организации исследовательской деятельности обучающихся естественно-научной специальности педагогического вуза на базе студенческой научной лаборатории факультета. В ходе исследования отрабатывается принцип метапредметности образования; с этой целью при реализации исследования используются межкафедральные и межвузовские связи. В качестве предмета исследований выбран синтез наночастиц. Описаны созданная лабораторная установка и методика получения наночастиц в процессе низкотемпературного испарительного синтеза.

Ключевые слова: студенческая научно-исследовательская лаборатория, наночастицы, синтез, методика исследований.

Natalya V. Naumenko

Belarusian State Pedagogical University named after M. Tank, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Dean of the School of Natural Sciences, Minsk, Republic of Belarus
e-mail: nata-n15@mail.ru

Gennady V. Kotov

Belarusian State Pedagogical University named after M. Tank, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Head of the Interdepartmental Scientific and Educational Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Minsk, Republic of Belarus
e-mail: kotovgv@mail.ru

Anna N. Murashkevich

Belarusian State Technological University named after M. Tank, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Chemistry, Technology of Electrochemical Production and Electronic Materials, Minsk, Republic of Belarus
e-mail: man@belstu.by

Alla L. Kozlova-Kozyrevskaya

Belarusian State Pedagogical University named after M. Tank, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Chemistry, Minsk, Republic of Belarus
e-mail: kozyrevskaya@tut.by

Research in the Field of Nanoparticle Synthesis in the Student Scientific Laboratory

Abstract. The article presents information about the organization of research activities of students in the natural science specialty of a pedagogical university on the basis of a student scientific laboratory of the faculty. In the course of the study, the principle of metasubjectivity of education is worked out; for this purpose, inter-departmental and inter-university relations are used in the implementation of the study. The synthesis of nanoparticles was chosen as the subject of research. The created laboratory setup and the procedure for obtaining nanoparticles in the process of low-temperature evaporative synthesis are described.

Keywords: student research laboratory, nanoparticles, synthesis, research methodology.

Введение (Introduction)

Формированию профессиональных компетенций современного педагога во многом способствует приобретение навыков учебной, практической и научно-исследовательской деятельности. Усиление роли исследовательской компоненты в процессе обучения — один из образовательных приоритетов.

Традиционно принято считать, что к исследовательской деятельности рационально привлекать наиболее подготовленных обучающихся. Однако при таком подходе значительная часть студентов — будущих учителей не получает опыта исследования и, как результат, не обладает соответствующими компетенциями. Следовательно, необходим поиск новых форм работы по привлечению обучающихся к исследовательской работе.

Студенческая научно-исследовательская лаборатория (СНИЛ) может служить платформой, на которой осуществляется не только подготовка высококвалифицированных научных кадров, но и организация и привлечение к учебно-исследовательской и научной деятельности обучающихся с самым различным уровнем подготовки [1; 2].

На факультете естествознания Белорусского государственного педагогического университета им. М. Танка (БГПУ) научно-исследовательская деятельность студентов ведется по трем направлениям: исследования в области педагогических наук (педагогика, методика преподавания в соответствии с профилем специальности); исследования в области естественных наук — химии, биологии и географии (в соответствии со специальностями факультета); междисциплинарные прикладные исследования (STEAM, образование для устойчивого развития, безопасность жизнедеятельности человека, основы безопасности жизнедеятельности).

Важнейшую роль в организации студенческой научно-исследовательской работы выполняют коллективы кафедр и факультетов. В рамках работы кафедр созданы студенческие научно-исследовательские лаборатории, которые объединяют студентов, магистрантов и аспирантов. СНИЛ концентрируются на исследовании одной научной проблемы (или нескольких смежных), которыми руководят преподаватели кафедр. К работе в СНИЛ привлекаются и учащиеся школ, которые приобретают здесь первый опыт исследовательской работы, позволяющий им повысить свою компетентность и рейтинг, участвовать (и побеждать) в конкурсах и научно-практических конференциях.

Научная деятельность осуществляется в лабораториях факультета, однако для выполнения более серьезных исследований активно используется лабораторная база партнеров. В последнее время всё большую роль играют

не только межкафедральные, но и межвузовские объединения, которые работают как на постоянной основе, так и объединяют различные структуры для выполнения конкретных срочных исследований. Все названные формы могут как быть задействованы в выполнении финансируемых тем, так и работать над самостоятельными исследованиями, результатом которых становятся курсовые, дипломные или магистерские диссертации их участников.

На факультете естествознания БГПУ имеется межкафедральная научно-образовательная лаборатория биотехнологии и биохимии, основная задача которой — привлечение к научно-исследовательской деятельности преподавателей, сотрудников и студентов. К числу основных направлений деятельности лаборатории относятся исследования в области безопасности в чрезвычайных ситуациях и синтеза наночастиц.

Несомненно, такие серьезные исследования не могут проводиться в рамках только одной лаборатории. Как результат, в совместную учебно- и научно-исследовательскую деятельность вовлечен целый ряд структурных подразделений. На кафедре химии факультета естествознания функционирует студенческая научно-исследовательская лаборатория «Сенсоры» (теоретическая и прикладная химия), проблематика которой направлена на разработку селективных полимерных покрытий с неорганическими наночастицами для датчиков анализа летучих органических соединений в воде и сложных ДНК-зондовых систем для одномолекулярного мутационного анализа. Эти исследования осуществляются совместно с кафедрой математического моделирования физического факультета Белорусского государственного университета, лабораторией физико-химических методов исследования Института биоорганической химии Национальной академии наук (НАН) Беларуси, кафедрой биоорганической химии Белорусского государственного медицинского университета, лабораторией нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. Благодаря материальной базе этих учреждений и помощи сотрудников студенты и магистранты имеют возможность проводить обработку результатов исследований и проверку полученных данных.

Научно-исследовательская работа студентов должна быть ориентирована на прогрессивные и актуальные научные исследования. Значительный интерес у студенческой аудитории вызывают исследования в области синтеза микро- и наночастиц, в частности, методом испарения микронных капель в аэрозольном реакторе. Отличительной особенностью этого метода является

достаточная простота, позволяющая проектировать, создавать и использовать лабораторные установки силами студентов, а актуальность студенческого научного интереса обусловлена также и широкими возможностями использования результатов исследования в прикладных образовательных проектах.

Методы (Methods)

Основными способами получения наночастиц достаточно длительное время считались методы, связанные с изменением размеров (от мелких к более крупным) и, наоборот, связанные с процессами диспергирования. В настоящее время всё большее применение находят способы получения, связанные с осуществлением синтеза в результате протекания химических реакций: методы химического соосаждения, разложения солей в высокотемпературном газовом потоке, гидротермальный синтез, золь-гель метод, метод высокотемпературного самораспространяющегося синтеза. При этом появляется значительно большее количество возможностей целенаправленного регулирования как состава, так и размеров частиц [3; 4; 5].

Такой синтез осуществляется, как правило, в жидких средах, и конечный продукт требует дополнительных усилий для его извлечения из реакционной среды. Этим недостатком лишен метод Low-Pressure Spray Pyrolysis (LPSP), при котором образование наночастиц происходит внутри микронных капель растворов при их испарении в аэрозольном реакторе. Высокая скорость испарения достигается за счет пониженного давления в реакторе и малого массового расхода капель раствора по сравнению с расходом газоносителя [6]. Образующийся продукт представляет собой тонкодисперсный порошок.

Для решения проблемы организации исследований в области синтеза наночастиц создан научный коллектив с участием сотрудников кафедры химии, межкафедральной научно-образовательной лаборатории факультета естественных наук БГПУ, а также кафедры химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники Белорусского государственного технологического университета (БГТУ).

В настоящем исследовании для реализации синтеза микро- и наночастиц был выбран метод испарения микронных капель в аэрозольном реакторе (LPSP).

В условиях высокой температуры и низкого давления при быстром испарении в объеме капли образуется пересыщенный раствор. В пересыщенном растворе в результате гомогенной нуклеации образуются кластеры, вырастающие до наноразмеров [7]. Практическая направленность метода LPSP обусловлена его сравнительной простотой и малой энергоемкостью.

Получение микро- и наночастиц методом распылительного пиролиза микронных капель растворов солей при пониженном давлении осуществляется уже более 20 лет. Для осуществления пиролиза создается достаточно высокая температура (выше 1000 К). Однако, как известно, вследствие испарительного охлаждения, интенсивно протекающего в среде с повышенной температурой, температура жидкости мало зависит от температуры внешней среды и не превышает ее собственную температуру кипения. Таким образом, быстрое испарение, сопровождающееся синтезом наночастиц, может быть достигнуто в среде с пониженной температурой [8].

Низкотемпературный синтез в ходе испарения микрокапель раствора — один из наиболее перспективных способов получения микро- и наночастиц в условиях осуществления научно-исследовательской работы с участием обучающихся, как студентов, так и школьников, с самым различным уровнем подготовки. Доступность в плане создания установки, простота осуществления эксперимента, обширный перечень возможностей исследования и применения полученного продукта — всё это позволяет привлекать широкий круг обучающихся на самых различных этапах исследований.

На рисунке 1 представлена общая схема установки для осуществления низкотемпературного синтеза, созданной в студенческой научно-исследовательской лаборато-

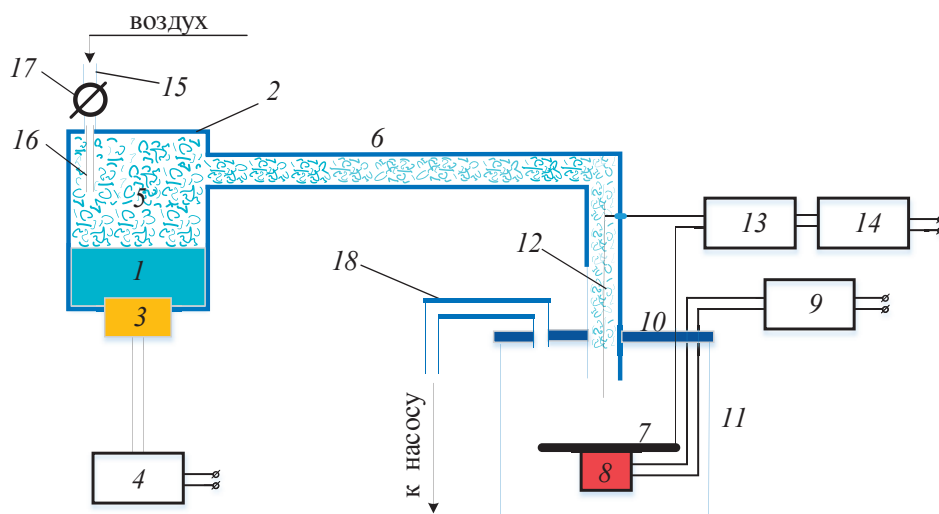


Рис. 1. Схема лабораторной установки низкотемпературного синтеза:

- 1 — исследуемый раствор; 2 — корпус генератора; 3 — небулайзер;
- 4, 9, 14 — низковольтные источники тока; 5 — аэрозоль; 6 — газоотводная трубка;
- 7 — подложка; 8 — нагреватель; 10 — верхняя часть приемного отделения;
- 11 — нижняя часть приемного отделения; 12 — электрод;
- 13 — высоковольтный источник тока; 15 — трубка для подачи воздуха;
- 16 — капилляр; 17 — регулировочный кран; 18 — место подключения вакуумного насоса

рии. Раствор исследуемого вещества 1 помещается в емкость 2, представляющую собой парогенератор. В корпусе генератора установлен небулайзер 3, подключенный к источнику питания 4. Ультразвуковой небулайзер распыляет раствор и обеспечивает генерацию микрокапель. При работе небулайзера в объеме генератора 2 образуется аэрозоль 5. По газоотводной трубке 6 аэрозоль поступает в приемное отделение. В приемном отделении находится металлическая подложка 7 для улавливания частиц, образующихся в результате синтеза. Температура подложки регулируется с помощью электронагревателя 8, подключенного к источнику тока 9. Приемное отделение представляет собой ловушку, верхняя часть которой имеет крышку 10, в которой находятся отверстия ввода-вывода проводов и газовых потоков, а также места крепления. Нижняя часть приемного отделения — герметизирующая емкость 11. В газоотводной трубке на входе в приемное отделение коаксиально установлен электрод 12, подключенный к высоковольтному источнику постоянного 13, работающему совместно с низковольтным источником постоянного тока 14. Рабочее напряжение на выходе источника 13 поддерживается на уровне 1–5 кВ. Электростатическое напряжение, возникающее между подложкой 7 и электродом 12, в значительной мере способствует увеличению выхода продукта синтеза.

В системе реализован проточный принцип. На входе в генератор имеется устройство регулируемой подачи воздуха. Воздух поступает через трубку 15, имеющую зауженную часть 16. Регулировка расхода воздуха и давления в системе осуществляются с помощью крана 17. Откачка воздуха производится с помощью вакуумного насоса через трубку 18, установленную в верхней части приемного отделения.

В зависимости от поставленных целей установка может быть упрощена или доукомплектована различным оборудованием: манометрами, расходомерами, датчиками температуры и пр.

Для подтверждения факта получения наноразмерного продукта, как правило, используется достаточно сложная техника, которой нет в наличии в СНИЛ. Предварительная оценка может быть осуществлена с помощью оптического микроскопа, однако это указывает только на то обстоятельство, что размер получаемых частиц менее 1 мкм. Для более точных исследований нужен специальный метод анализа, такой как определение удельной поверхности.

Достаточно совершенными по точности и разрешающей способности являются адсорбционные методы определения удельной поверхности: по адсорбции азота, бензола, паров воды; по тепловой десорбции газов, таких как азот, гелий, аргон и др. Уравнение, выражающее соотношение между количеством адсорбированного газа и давлением или относительным давлением при постоянной температуре, называется изотермой адсорбции. Несмо-

тря на то, что было предложено большое число уравнений, описывающих изотерму адсорбции, уравнение БЭТ (Брунауэр, Эммет, Теллер) сохраняет свою практическую пользу уже в течение многих лет [9].

Уравнение БЭТ записывается в виде

$$\frac{p}{v_a (p_0 - p)} = \frac{1}{v_m c} + \frac{(c - 1)p}{v_m c p_0}, \quad (1)$$

где v_a — количество адсорбированного пара (адсорбата) при равновесном давлении p , моль адсорбата на 1 г адсорбента; v_m — емкость монослоя на поверхности, т. е. число молей адсорбата в расчете на 1 г адсорбента, требуемое для покрытия всей поверхности плотным монослоем адсорбированных молекул; p_0 — давление насыщенного пара при выбранной температуре; c — константа, являющаяся функцией теплоты адсорбции и зависящая от химической природы поверхности.

Среди методов, которые могут быть реализованы в рамках образовательного процесса при измерении удельной поверхности грубодисперсных порошков, следует отметить метод воздухопроницаемости, осуществляемый с помощью приборов ПСХ-2 и ПСХ-4. Несмотря на то, что данный метод имеет низкую разрешающую способность, он достаточно прост и применяется в диапазоне измерений удельной поверхности $S_{уд}$ от 0,15 до 1,2 м²/г. Функциональная схема прибора для определения удельной поверхности методом воздухопроницаемости представлена на рисунке 2.

Навеску порошка 1 помещают в кювету 2 прибора и уплотняют плунжером 3 под прессом при удельном давлении ≈9,8 МПа. Удаляют плунжер из кюветы, открывают кран 4 и с помощью груши 5 создают разрежение под слоем порошка. Разрежение должно быть таким, чтобы жидкость в манометре 6 поднялась до уровня верхней колбы 7 прибора. Закрывают кран и измеряют по секундомеру время прохождения мениска жидкости в манометре между рисками. Измеряют высоту столба воздуха, с учетом температуры воздуха и высоты слоя порошка находят по таблице паспорта к прибору значение величины M .

Удельную поверхность (м²/г) вычисляют по формуле

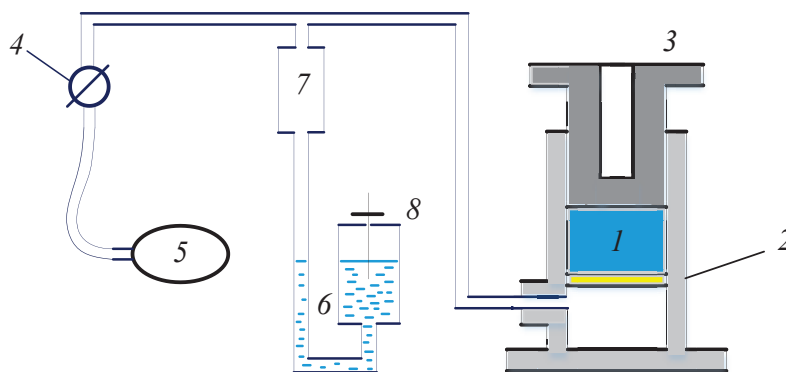


Рис. 2. Схема прибора для определения удельной поверхности методом воздухопроницаемости:

1 — исследуемый образец; 2 — кювета; 3 — плунжер; 4 — кран; 5 — груша; 6 — манометр; 7 — верхняя колба; 8 — нижняя колба

$$S_{y,d} = \frac{KM\sqrt{\tau}}{m}, \quad (2)$$

где K — константа прибора; M — полуэмпирический коэффициент; m — масса порошка, г; τ — время прохождения мениска жидкости между двумя рисками, с.

Недостатком адсорбционных методов (в том числе по воздухопроницаемости) является необходимость использования специальной аппаратуры, иногда вакуумной. При адсорбции каких-либо специфических ионов или молекул из раствора (водного либо органического) требуется более простое оборудование и такие методы, как правило, более удобны для текущей работы.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

В СНИЛ с помощью описанной выше методики был осуществлен синтез частиц из водных растворов солей меди, железа, никеля и щелочных металлов [10]. Изменение условий синтеза осуществляется регулировкой давления в системе и расхода воздуха. Например, при использовании в качестве исходного вещества хлорида меди состав продуктов синтеза с ростом давления изменяется в ряду $\text{Cu}^0\text{--Cu}^{+1}\text{--Cu}^{+2}$. На это указывают результаты проведенного элементного анализа. Однако к такому же выводу можно прийти, если наблюдать за окраской конечного продукта. Характерная окраска исходного вещества, оксидов одно- и двухвалентной меди позволяет подбирать условия синтеза, целенаправленно ведущие к получению конкретного продукта. Всё это делает процесс более иллюстративным и, соответственно, более интересным для обучающихся.

При давлении порядка 0,1 МПа студентами факультета естествознания БГПУ был осуществлен низкотемпературный синтез с использованием в качестве исходного вещества силиката натрия (химически чистого). Величина удельной поверхности продукта синтеза по адсорбции фенола из раствора в гептане определялась в рамках образовательного процесса студентами факультета химической технологии и техники БГТУ.

Для проведения анализа отбирается навеска 0,5 ÷ 5,0 г предварительно просеянного через сито с сеткой № 014 К по ГОСТ 3584–73 и высушенного при 105 °С до постоянной массы вещества с погрешностью не более 0,0002 г (в зависимости от величины удельной поверхности). В бюкс с навеской доливается 10 мл рабочего раствора фенола в *n*-гептане. Смесь перемешивается в шейкере в течение 1 ч. Далее пробе дают отстояться 5–10 мин. и осветленный раствор быстро фильтруют в пробирку, закрывают притертой пробкой. Величину начальной и конечной концентрации фенола в растворе определяют с помощью жидкостного интерферометра, раствором сравнения является чистый гептан.

Удельную поверхность $S_{y,d}$ в м²/г вычисляют по формуле

$$S_{y,d} = \frac{\Delta C \cdot 10 \cdot 26 \cdot 10^{-16} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4}}{m \cdot 1000} = \frac{\Delta C}{m} \cdot 1,5652, \quad (3)$$

где ΔC — изменение концентрации фенола в растворе в результате адсорбции, ммоль/дм³; $26 \cdot 10^{-16}$ — площадь, занимаемая одной молекулой фенола на поверхности порошка, см²; $6,02 \cdot 10^{23}$ — число Авогадро, моль⁻¹; 10^{-3} — коэффициент пересчета ммоль/дм³ в моль/дм³; 10^{-4} — коэффициент пересчета см² в м²; m — масса навески, г; 10 — объем раствора, см³; 1000 — коэффициент пересчета см³ в дм³.

При массе навески порядка 0,24 г в ходе опыта величина удельной поверхности образцов продукта синтеза составила 33–48 м²/г. При учете значения теоретической плотности ρ порошка диоксида кремния для оценки величины среднего размера полученных частиц в приближении, что они имеют сферическую форму, использовано соотношение $d_{cp} = 6/\rho S_{y,d}$. В результате средний размер наночастиц определен как 57–85 нм.

Деятельность в СНИЛ предоставляет обучающимся возможность сделать «первый шаг в науку», открывает новые, ранее не известные им перспективы. Результатом работы в СНИЛ становятся не только навыки исследовательской деятельности, но и опыт взаимодействия с коллегами, умения получать и анализировать новую информацию, готовить научные статьи, выступать с докладами на научных конференциях, отстаивать свою точку зрения. Наличие конкретных результатов повышает уровень самооценки обучающихся. Так, только за 2021/22 учебный год студенты стали соавторами 14 научных работ по заявленной тематике и приняли участие в научно-практических конференциях и семинарах в Республике Беларусь, России и Азербайджане.

Заключение (Conclusion)

В системе высшего педагогического образования всё более актуальной становится разработка эффективных методов, позволяющих организовать образовательный процесс таким образом, чтобы его результат проявлялся в генерировании у будущих педагогов системы профессионально значимых знаний и умений.

Исследовательская деятельность обучающихся должна осуществляться не только в рамках учебных занятий, но и во внеаудиторное время с участием преподавателей, кафедр, лабораторий и различных учебных и научных организаций. Исследования должны осуществляться в прогрессивных, актуальных научных отраслях. Значительную роль здесь играет изучение мнения студенческой аудитории с целью выявления наиболее популярных научных направлений.

Одним из таких направлений является синтез микро- и наночастиц методом испарения микронных капель в аэрозольном реакторе. Этот метод достаточно прост, а создание лабораторной установки не вызывает сложности. К проведению исследований в данной области может привлекаться самая широкая аудитория — от учащихся школьных учреждений до научных работников.

Возможности синтеза наночастиц открывают широкую перспективу их дальнейшего использования. Высокая биологическая и химическая активность синтезированных наноразмерных соединений дает возможность их эффективного применения в таких областях, как микробиология, сельское хозяйство, огнезащита, получение новых материалов и др.

Основная задача СНИЛ — привлечение студентов к участию в современных и актуальных исследованиях, что дает им возможность изучения научных основ, способов проведения эксперимента и методов анализа полученных результатов.

Оптимальным результатом следует считать получение опыта научно-исследовательской работы, углубление знаний в исследуемой области, а также развитие научного кругозора и умения принимать самостоятельные решения.

Библиографический список

1. Огородник В. Э. Процессуально-деятельностный компонент модели методической подготовки будущего учителя химии // *Образование в современном мире: достижения, вызовы, перспективы* : сб. науч. тр. Всерос. науч.-метод. конф. с междунар. участием / отв. ред. Т. И. Руднева. Самара : Ваш Взгляд, 2020. С. 263–268.
2. Воробьева Т. Н., Василевская Е. И. Студенческая научно-исследовательская лаборатория как платформа для подготовки высококвалифицированных кадров // *Свиридовские чтения* : сб. ст. / пред. редкол. О. А. Ивашевич ; отв. ред. Т. Н. Воробьева. Минск : Красико-принт, 2020. Вып. 16. С. 147–156.
3. Мурашкевич А. Н. Взаимодействие оксида титана с гидроксидом натрия в гидротермальных условиях // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук*. 2020. Т. 56, № 2. С. 150–157. DOI: 10.29235/1561-8331-2020-56-2-150-157
4. Кривошапкин П. В. Физико-химические основы модификации поверхности целлюлозных, углеродных и керамических материалов наноразмерными оксидами металлов : дис. ... д-ра хим. наук. СПб., 2019. 301 с.
5. Попова А. А., Шубин И. Н. Анализ влияния свойств нанодispersных систем на конструкции технологического оборудования // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2020. № 7. С. 3–12. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-7-3-12
6. Пенязьков О. Г., Саверченко В. И., Фисенко С. П. Низкотемпературный пиролиз и получение наночастиц при быстром испарении микронных капель водных растворов // *Письма в журнал технической физики*. 2013. Т. 39, № 3. С. 56–65.
7. Control of Size and Morphology in NiO Particles Prepared by a Low-Pressure Spray Pyrolysis / I. W. Lenggoro, Z. Itoh, N. Lida, K. Okuyama // *Materials Research Bulletin*. 2003. Vol. 38, no. 14. P. 1819–1827.
8. Делендик К. И., Саверченко В. И., Фисенко С. П. Пиролиз фемтолитровой капли в низкотемпературном аэрозольном реакторе при пониженном давлении // *Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физико-технических наук*. 2012. № 4. С. 29–33.
9. Полторак О. М. Термодинамика в физической химии. М. : Высшая школа, 1991. 318 с.
10. Низкотемпературный синтез наночастиц при интенсивном испарении микрокапель / Г. В. Котов, С. Ю. Елисеев, А. Л. Козлова-Козыревская, Э. К. Казак // *Инновационные материалы и технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск : Белорус. гос. технолог. ун-т, 2022. С. 138–140.*

References

- Delendik K. I., Saverchenko V. I., Fisenko S. P. (2012) Piroлиз femtolitrovoy kapli v nizkotemperaturnom aehrozol'nom reaktore pri ponizhenom davlenii [Pyrolysis of Femtoliter Droplet Inside a Low-Temperature Aerosol Reactor Under Low Pressure], *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series]*, no. 4, pp. 29–33. (in Russian)
- Kotov G. V., Eliseev S. Yu., Kozlova-Kozyrevskaya A. L., Kazak Eh. K. (2022) Nizkotemperaturnyi sintez nanochastits pri intensivnom isparenii mikrokapel' [Low-Temperature Synthesis of Nanoparticles with Intensive Evaporation of Microdroplets], *Innovatsionnye materialy i tekhnologii [Innovation Materials and Technologies]*. Minsk, Belorusskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet Publ., pp. 138–140. (in Russian)
- Krivoschapkin P. V. (2019) *Fiziko-khimicheskie osnovy modifikatsii poverkhnosti tsellyuloznykh, uglerodnykh i keramicheskikh materialov nanorazmernymi oksidami metallov [Physical and Chemical Bases of Surface Modification of Cellulose, Carbon, and Ceramic Materials with Nanosized Metal Oxides]**, Dr. Chem. sci. diss. Saint Petersburg, 301 p. (in Russian)
- Lenggoro I. W., Itoh Z., Lida N., Okuyama K. (2003) Control of Size and Morphology in NiO Particles Prepared by a Low-Pressure Spray Pyrolysis, *Materials Research Bulletin*, vol. 38, no. 14, pp. 1819–1827. (in English)
- Murashkevich A. N. (2020) Vzaimodeistvie oksida titana s gidroksidom natriya v gidrotermal'nykh usloviyakh [Interaction of Titanium Oxide with Sodium Hydroxide at Hydrothermal Conditions], *Vestsi Natsyonal'nai akadehmii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series]*, vol. 56, no. 2, pp. 150–157, doi: 10.29235/1561-8331-2020-56-2-150-157 (in Russian)
- Ogorodnik V. Eh. (2020) Protsessual'no-deyatel'nostnyi komponent modeli metodicheskoi podgotovki budushchego uchitelya khimii [The Procedural and Activity Component of the Model of Methodological Training of the Future Teacher of Chemistry]*, *Rudneva T. I. (ed.) Obrazovanie v sovremennom mire: dostizheniya, vyzovy, perspektivy [Education in the Modern World: Achievements, Challenges, Prospects]**. Samara, Vash Vzglyad Publ., pp. 263–268. (in Russian)
- Penyaz'kov O. G., Saverchenko V. I., Fisenko S. P. (2013) Nizkotemperaturnyi piroliz i poluchenie nanochastits pri bystrom isparenii mikronnykh kapel' vodnykh rastvorov [Low-Temperature Pyrolysis and the Production of Nanoparticles During the Rapid Evaporation of Micron Droplets of Aqueous Solutions]*, *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki [Letters to the Journal of Technical Physics]**, vol. 39, no. 3, pp. 56–65. (in Russian)
- Poltorak O. M. (1991) *Termodinamika v fizicheskoi khimii [Thermodynamics in Physical Chemistry]**. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 318 p. (in Russian)

Popova A. A., Shubin I. N. (2020) Analiz vliyaniya svoystv nanodispersnykh sistem na konstruktzii tekhnologicheskogo oborudovaniya [An Analysis of the Influence of the Properties of Nanodispersed Systems on the Design of Technological Equipment], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]*, no. 7, pp. 3–12, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-3-12 (in Russian)

Vorob'eva T. N., Vasilevskaya E. I. (2020) Studencheskaya nauchno-issledovatel'skaya laboratoriya kak platforma dlya podgotovki vysokokvalifitsirovannykh kadrov [Student Research Laboratory as a Platform for Training Highly Qualified Personnel]*, *Ivashkevich O. A., Vorob'eva T. N. (eds.) Sviridovskie chteniya [Sviridov Readings]**. Minsk, Krasiko-print Publ., issue 16, pp. 147–156. (in Russian)

* Перевод названий источников выполнен авторами статьи / Translated by the authors of the article.