

Г5  
А437

# Актуальные проблемы химии высоких энергий



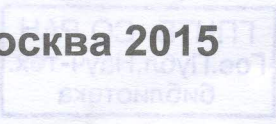
Москва  
2015

Экз. 28

# Актуальные проблемы химии высоких энергий

# Актуальные проблемы ХИМИИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Москва 2015



© Авторы доклада, 2015

Член-корреспондент РАН Е.Б. Грамм

ISBN 978-5-99691-797-1

УДК 544.54  
ББК 24.5  
А437

**Сопредседатели конференции**

Ершов Б.Г.,  
член-корреспондент РАН ИФХЭ РАН  
Тарасова Н.П.,  
член-корреспондент РАН РХТУ

**Организационный комитет  
конференции (по алфавиту):**

Алдошин С.В.,  
академик Президиум РАН  
Алфимов М.В., академик ЦФ РАН  
Гильман А.Б. ИСПМ РАН  
Зезин А.А. ИСПМ РАН  
Калмыков С.Н. Химический  
факультет МГУ  
Кирюхин В.П. ИПХФ РАН  
Магомедбеков Э.П. РХТУ  
Макаров И.Е. ИФХЭ РАН  
Мельников М.Я. Химический  
факультет МГУ

Молин А.А. ТП «Радиационные  
технологии»  
Молин Ю.Н., академик ИКГ СО РАН  
Мясоедов Б.Ф., академик ИФХЭ РАН  
Пономарев А.В. ИФХЭ РАН  
Путилов А.В. НИЯУ МИФИ  
Сазонов А.Б. РХТУ  
Сапрыкин О.А. ЦНИИМАШ  
Смирнов В.П.,  
академик ГК «Росатом»  
Разумов В.Ф.,  
член-корреспондент РАН ИПХФ РАН  
Фельдман В.И. Химический  
факультет МГУ  
Цивадзе А. Ю., академик ИФХЭ РАН  
**Ученые секретари конференции:**  
к.х.н. Занин А.А. РХТУ  
к.х.н. Раздрокина С.П. ИФХЭ РАН

**А437 VI Российская конференция (с приглашением специа-  
листов стран СНГ) «Актуальные проблемы химии высоких  
энергий»: г. Москва, 20–22 октября 2015 г. — М.: Издатель-  
ство «Граница», 2015. — 368 с., ил.**

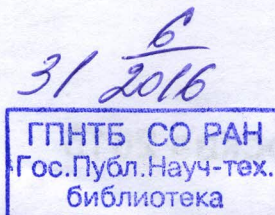
**ISBN 978-5-94691-797-1**

Сборник включает краткое содержание докладов (под общей редакцией члена-корреспондента РАН Ершова Б.Г.) участников VI Российской конференции (с приглашением специалистов стран СНГ) «Актуальные проблемы химии высоких энергий», состоявшейся 20–22 октября 2015 года в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева (Миусская площадь, 9, Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева). Конференция организована Российской академией наук, Научным советом РАН по физической химии, Институтом физической химии и электрохимии им. А.Н.Фрумкина РАН, Российским химико-технологическим университетом имени Д.И. Менделеева, Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова и Технологической платформой «Радиационные Технологии».

Сборник предназначен для специалистов в области химии высоких энергий.

УДК 544.54  
ББК 24.5

ISBN 978-5-94691-797-1



© Авторы докладов, 2015

VI Российская конференция (с приглашением специалистов стран СНГ) «Актуальные проблемы химии высоких энергий» по своей тематике охватывает практически весь спектр исследований химических и физико-химических процессов, протекающих в веществе и материалах под воздействием нетепловой энергии. В том или ином охвате обсуждаются эффекты, вызванные действием ионизирующего излучения, света различного диапазона, электрических разрядов, плазмы, ультразвука и других высокоэнергетических факторов. Первостепенное внимание уделено изучению механизмов и кинетики реакций с участием ионов, радикалов и возбужденных частиц, установлению их природы и свойств, измерению констант скоростей реакций с их участием, а также обсуждению роли радиации в развитии важных природных явлений.

Фактором, по-прежнему, оказывающим значительное стимулирующее влияние на развитие одного из основных разделов химии высоких энергий – радиационную химию, является расширяющийся вклад АЭС в общую энергетику. Поэтому остается актуальным экспериментальное и теоретическое изучение состояния теплоносителя (воды и новых веществ), коррозионных процессов, стойкости используемых материалов, а также решение многочисленных проблем с переработкой использованного ядерного топлива и утилизацией радиоактивных отходов. Также в последние десятилетия постоянно расширяется использование радиационных технологий в промышленности, медицине и сельском хозяйстве. Согласно данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), стоимость продукции радиационных и изотопных технологий уже становится сопоставимой со стоимостью энергии, производимой АЭС. Здесь следует указать на то, что преимущественное использование в качестве источника ионизирующего излучения получили ускорители электронов. Поэтому на конференции мы уделяем большее внимание проблеме создания установок современного типа в нашей стране.

Поступательно развиваются и многие другие направления химии высоких энергий, связанные, в частности, с изучением действия УФ-света, плазмы и электрических разрядов на вещества в различных состояниях. Здесь важно отметить, что экспериментально-теоретические исследования успешно сочетаются с работой по использованию полученных результатов в практических целях.

В текущем году исполняется 120 лет со дня рождения одного из основоположников радиационной химии – профессора Натальи Алексеевны Бах, которая впервые начала системные исследования радиационно-химических превращений веществ в нашей стране и сформировала научную школу, продолжающую свое успешное развитие. Также исполняется 85 лет члену-корреспонденту РАН Алексею Константиновичу Пикаеву и профессору Ленару Тимофеевичу Бугаенко, 80 лет профессору Игорю Мстиславовичу Баркалову. Все они внесли неоценимый вклад в становление химии высоких энергий и мы бережно храним память о них.

С участием ведущих ученых и специалистов нашей страны в химии высоких энергий на конференции обсуждены фундаментальные проблемы развития этой важной области науки, тенденции формирования инновационных направлений химической технологии, а также практические вопросы создания современных ускорителей электронов и других аппаратов. Материалы конференции, можно надеяться, будут интересны и полезны научным сотрудникам, работающим в области химии высоких энергий, химической технологии, экологии и охраны окружающей среды, а также инженерно-техническим специалистам, связанным с эксплуатацией ускорителей электронов и других источников нетепловой энергии.

**Член-корреспондент РАН Ершов Б.Г.**

# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ХИМИИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

**VI Российская конференция  
(с приглашением специалистов стран СНГ)**

*Компьютерная верстка: Ермолаев В.М., Раздрокина С.П.*

**Формат 60x84/8. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Тираж 250 экз.  
Заказ № 845.**

**ООО «Издательская группа «Граница»  
123007 Москва, Хорошевское шоссе, 38  
Тел.: (495) 941-26-66, 941-27-49.  
Факс: (495) 941-36-46.  
E-mail: [granica\\_publish@mail.ru](mailto:granica_publish@mail.ru)  
<http://granicagroup.ru>**

## РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ В ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО РАН

Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Горбунов В.А., Кокин Е.Н.,  
Коробейников М.В., Лукин А.Н., Нехаев В.Е., Максимов С.А., Панфилов А.Д., Радченко  
В.М., Штарклев Е.А., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Факторович Б.Л.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской Академии наук (ИЯФ СО РАН,  
Россия, г. Новосибирск, e-mail: mkor@inp.nsk.su*

В Институте ядерной физики на протяжении десятилетий ведутся исследования по изучению воздействий электронных пучков на различные процессы. Ниже описаны основные работы последних лет.

*Экспериментальная часть – реакторы для радиационно-термических процессов*

Радиационно-термическая обработка проводилась с помощью ускорителя ИЛУ-6, расположенного в Институте ядерной физики СО РАН. Энергия электронов 2.4 МэВ, ток пучка в импульсе до 400 мА, средний ток пучка до 4 мА.

Для проведения радиационно-термических экспериментов использовался специальный теплоизолированный реактор, боковые стенки которого были изготовлены из шамотного кирпича (Рисунок 1), а крышка представляла собой пластину из пенокварца (плотность 0.15 г/см<sup>3</sup>) толщиной 0.2-0.3 см.

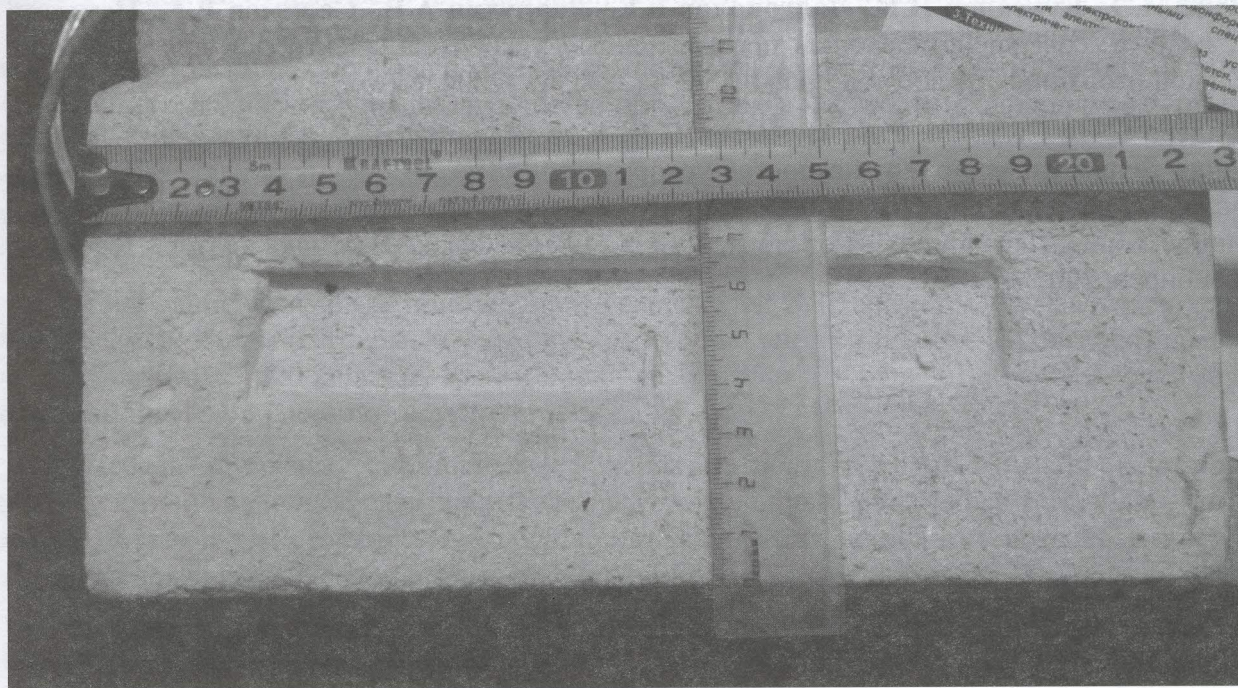


Рис. 1: Рабочая область реактора радиационно-термического синтеза

Реактор устанавливался в корпусе под выпускным окном ускорителя таким образом, чтобы образцы размещались в реакторе в зоне наибольшей однородности дозы прямо под выпускным окном ускорителя, как это показано на Рисунке 2.

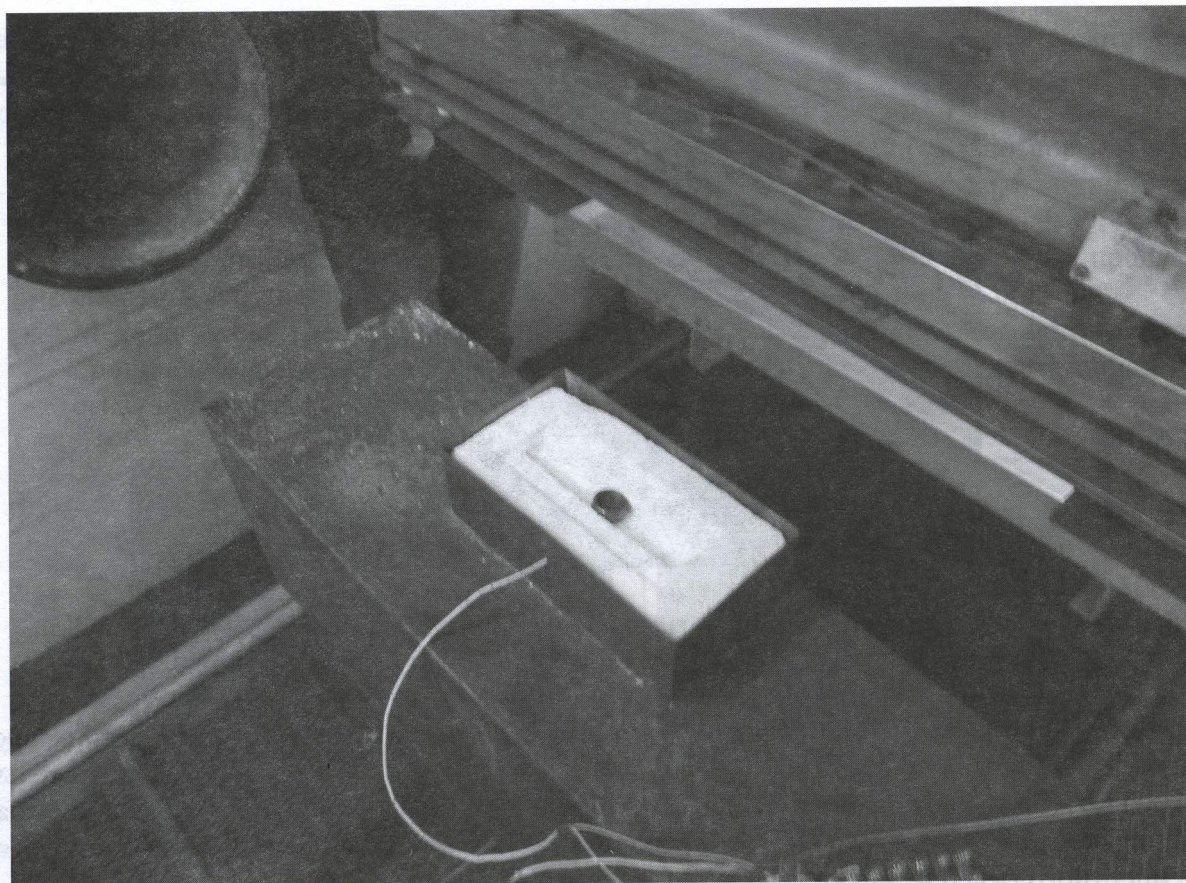


Рис. 2: Реактор под выпускным окном ускорителя электронов ИЛУ-6

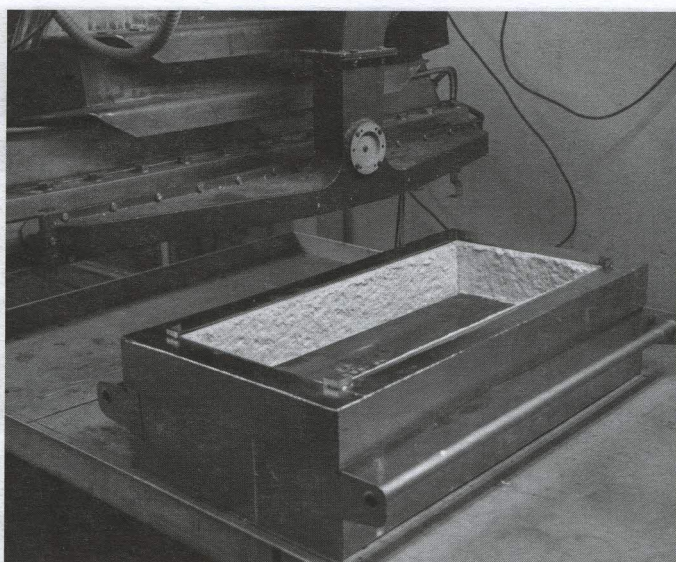
Образцы в этом реакторе нагревались только пучком электронов. Ускоритель управлялся программой, обеспечивающей возможность стабилизации температуры в соответствии с задаваемым графиком. Температура образца измерялась термопарой (на Рисунке 2 виден её провод). В большинстве экспериментов температурный график состоял из двух участков: нагрева и стабилизации температуры. Охлаждение реакционных смесей проводилось естественным путем (в отдельных экспериментах проводилось контролируемое охлаждение при электронно-лучевом воздействии). Скорость нагрева во всех экспериментах составляла  $100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . Стабилизация температуры при  $700\text{-}1000^{\circ}\text{C}$  происходила в течение 10 мин. Средний ток пучка на стадии нагрева не превышал 4.5 мА. Средний ток пучка при стабилизации температуры составлял 1.5-2.5 мА.

Максимальная рабочая температура в реакторе -  $1250^{\circ}\text{C}$ , максимальная достигнутая температура -  $1400^{\circ}\text{C}$ .

В этом реакторе проводились работы по радиационно-термическому синтезу ферритов совместно с Институтом химии твёрдого тела и механохимии СО РАН. Было показано, что радиационно-термический синтез ферритов начинается при температурах на  $200\text{-}250^{\circ}\text{C}$  ниже, чем порог термического синтеза. Были подобраны режимы обработки, при которых синтез ферритов полностью завершился за 10-15 минут (вместо десятков часов в случае термического синтеза).

Для работ в диапазоне температур до  $400^{\circ}\text{C}$  был изготовлен реактор с электрическим нагревателем, показанный на Рисунке 3. Внутренний объём этого реактора позволяет загружать большое количество обрабатываемых материалов.

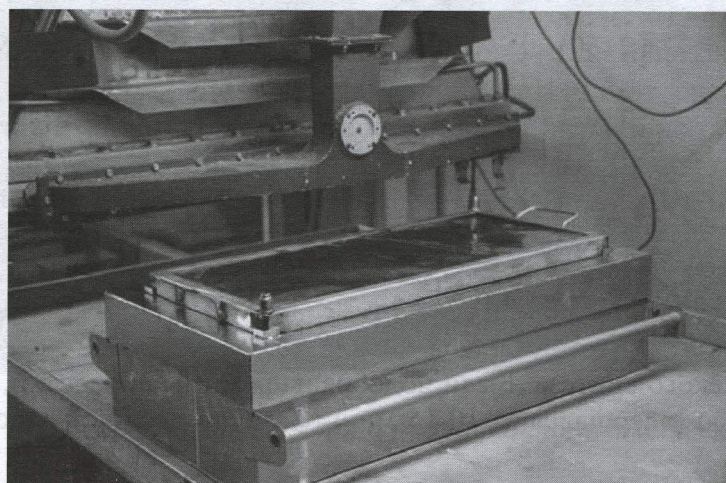
Снизу в этом реакторе установлен электрический нагреватель, который позволяет нагревать образцы до температуры  $400^{\circ}\text{C}$  без воздействия электронного пучка. Собрана схема управления нагревателем, позволяющая осуществлять программированный прогрев реактора.



*Рис. 3: Реактор с электрическим нагревателем (в открытом виде) рядом с выпускным окном ускорителя ИЛУ-6*

Реактор был изначально предназначен для проведения радиационно-термических процессов крекинга тяжёлых углеводородов (гудрона, смолы обжиговых печей, пека, тяжёлых нефтей). Для термоизоляции и изоляции от окружающей атмосферы была сделана съёмная крышка, позволяющая подавать внутрь и отводить газ от внешнего источника – планируется подача инертного газа (см. Рисунок 4).

В 2014 году в этом реакторе проводились исследования по термическому и радиационно-термическому разложению смолы обжиговых печей. Подогрев образцов позволяет сократить затраты мощности электронного пучка и таким образом увеличить экономическую эффективность процессов в будущем при последующем их масштабировании. Работы ведутся совместно с Институтом химии твёрдого тела и механохимии СО РАН. Цель работ – изучение возможностей процессов электронно-лучевой обработки тяжёлых углеводородных соединений (в том числе гудрона, смолы обжиговых печей и пека).



*Рис. 4: Реактор с электрическим нагревателем накрыт крышкой, позволяющей подавать внутрь инертный газ*

*Разработка перспективных материалов для хирургии*

Исследование влияния облучения на образцы плёнок, приготовленных методом электроспиннинга с различными пропитками, производилось в рамках создания протезов крове-



носных сосудов совместно с Институтом химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН.

Требования к имплантатам:

- Биосовместимость, включая совместимость с кровью и хорошую совместимость с клетками организма – адгезию, возможность перемещения и прорастания внутри структуры
- Стабильность биодеградации, включающая в себя отсутствие токсичных продуктов, и скорость деградации, соответствующая скорости роста замещающей ткани
- Механические характеристики, позволяющие выдержать механические нагрузки на протяжении формирования новой ткани организма (в том числе, достаточная усталостная прочность)

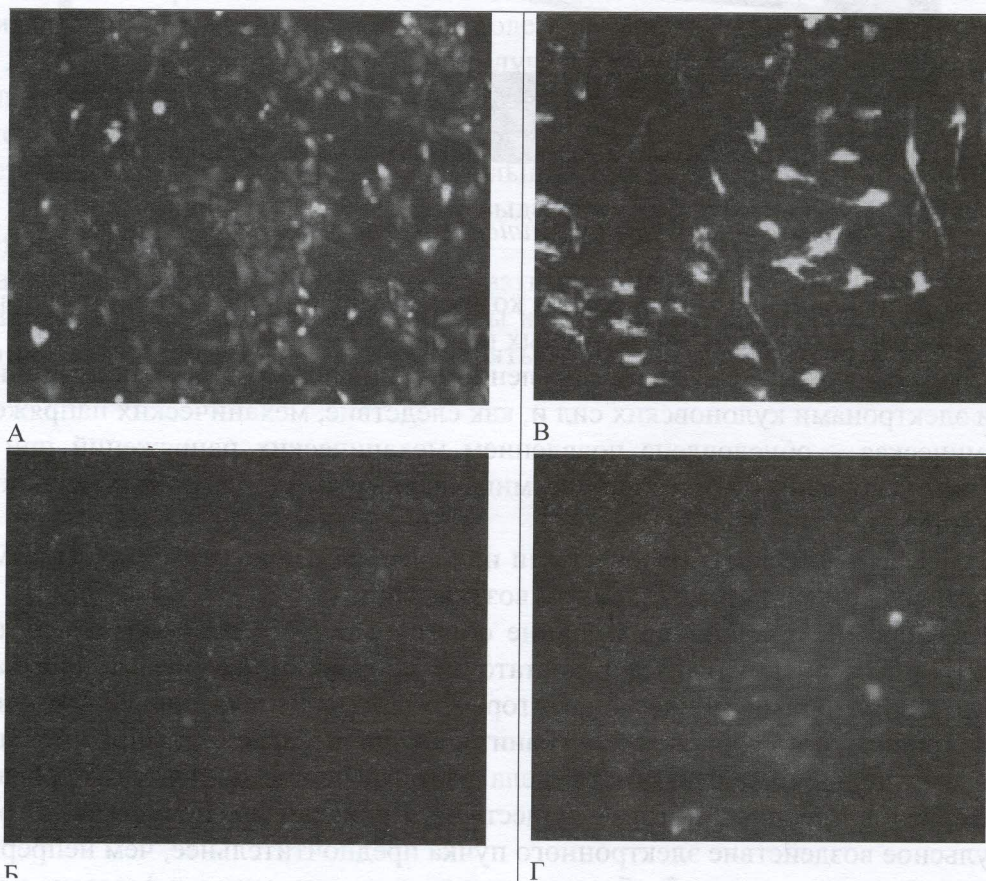


Рис. 5: Жизнеспособность клеток на матрицах по результатам флуоресцентной микроскопии (живые клетки – зелёные, мёртвые – красные).

А и Б – эндотелиоциты на поликапролактоне и PLGA (полилактид-ко-гликолид),  
В и Г – фибробласты на нейлоне 6 и поликапролактоне с желатином.

Исследовались механические свойства образцов, включая испытания на усталостную прочность. Обработка дозой до 25 кГр не приводила к изменению механических свойств плёнок. Дозы в интервале от 50 до 100 кГр увеличивали жёсткость материалов, а дозы свыше 150-200 кГр приводили к более быстрому разрушению при механических нагрузках.

Первые опытные образцы протезов уже успешно вживлены мышам. Конечная цель – нарастание собственных тканей организмов на этих протезах.

#### Перспективы радиационной обработки рудоконцентратов

Совместно с Институтом горного дела СО РАН проводились исследования по радиационной обработке измельчённых руд. Облучение большинства рудных образцов привело к

уменьшению энергозатрат на последующее измельчение, повышению раскрываемости руды и повышению выхода соединений цветных металлов.

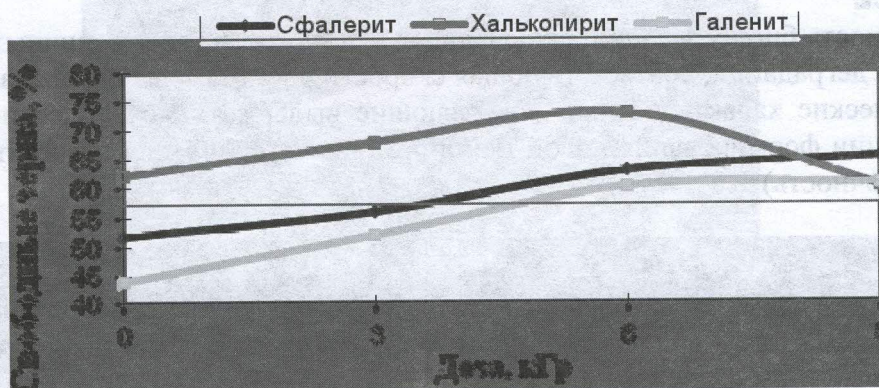


Рис. 6: Уровень раскрытия минералов в зависимости от дозы

Гипотезы разупрочнения минеральных компонентов при обработке интенсивным электронным пучком рассматривают три основных причины:

- Электростатическая – связана с появлением в минералах при их облучении ускоренными электронами кулоновских сил и, как следствие, механических напряжений;
- Термическая – обусловлена появлением механических напряжений при тепловом действии ускоренных электронов на минеральные компоненты и возможностью теплового пробоа;
- Химическая – связана с химическими или физико-химическими процессами в минеральном веществе при радиационном воздействии.

Распределение напряжений по толщине образцов руды в процессе обработки интенсивным электронным пучком является достаточно сложным: растягивающие напряжения чередуются со сжимающими, причем в некоторых областях напряжение со временем меняет знак. Предел прочности на растяжение у гранита, кварца и магнетита много меньше, чем на сжатие. Поэтому первыми достигают предела растягивающие напряжения, образующие у хрупких материалов трещину, которая существенно снижает их прочность. С этой точки зрения импульсное воздействие электронного пучка предпочтительнее, чем непрерывное.

Радиационно-термическая обработка железных руд приводила к фазовым переходам и появлению магнитных свойств у немагнитных соединений железа (происходило, в частности, образование магнетита), что позволило использовать метод магнитной сепарации для дальнейшего обогащения руды.

Установлено, что при достижении максимальной температуры 400°C под действием обработки пучком ускоренных электронов, удельный магнитный момент минералов увеличивается: в 57 раз для пирита с размерами частиц 75–180 мкм; в 43 раза для пирита крупностью 53–75 мкм; в 291 раз для арсенопирита крупностью 53–75 мкм; в 921 раз для арсенопирита с величиной зерен менее 53 мкм; в 9.7 раза для халькопирита с размерами частиц 75–180 мкм. При этом величина удельного магнитного момента минералов зависит как от температуры, так и от крупности обрабатываемых частиц сульфидов.

Большая разница между удельным магнитным моментом исходного и обработанного пучком ускоренных электронов минерала характерна для арсенопирита.

Одним из направлений использования радиационно-термической обработки является возможность разделения оловянных продуктов, содержащих арсенопирит. Установлено, что обработка пучком ускоренных электронов сульфидно-мышьяковистых оловянных концен-

тратов позволяет интенсифицировать процесс их последующей магнитной сепарации. При этом в магнитную фракцию извлекается более 70% железа и около 90% мышьяка.

*Перспективы радиационной обработки в сельском хозяйстве*

Совместно с Институтом экспериментальной ветеринарии Сибири и Дальнего Востока Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ИЭВСиДВ Россельхозакадемии) проводились работы по электронно-лучевой обработке кормовых смесей для птиц с целью увеличения срока годности продуктов северного завоза.

Обработка дозой 4 кГр и выше приводила к существенному снижению обсеменённости ингредиентов комбикормов и повышению срока хранения. Колиформы в образцах не были обнаружены при дозах свыше 12 кГр. Споровые формы микроорганизмов переживают обработку дозой 12 кГр.

Радиационная обработка может быть использована для продления срока хранения и уменьшения потерь при хранении, так как полезные (питательные) свойства ингредиентов при таких дозах не изменяются. Электронно-лучевая обработка также потенциально может быть использована для обработки партий ингредиентов комбикормов с уровнем обсеменённости выше нормы для последующего использования и продления сроков хранения.

В настоящее время осуществляется начальный этап работы по радиационной обработке крахмалов для последующего получения и выделения микробиологической глюкозы (с её дальнейшей переработкой).

Радиационные технологии начали развиваться в начале 60-х годов XX века, и их развитие продолжается до настоящего времени. Мы надеемся, что вышеописанные работы будут продолжены и, в последующем, будут применяться в нашей стране.