

Поиски других теплоносителей, кроме известных, для быстрых реакторов пока успехов не принесли. В работе [15] в качестве альтернативы рассматривается использование диссоциирующей четырехоксида азота  $N_2O_4$ . Реактор с таким теплоносителем, по данным А. К. Красина и др., может обеспечить примерно одинаковое с натриевыми реакторами время удвоения.

Итак, с удовлетворением можно констатировать, что реакторы с газовым охлаждением в недалекой перспективе могут быть эффективно использованы как на АЭС, так и в качестве источников тепла высокой температуры для технологических процессов в промышленности. Развитие последнего направления только начинается и, конечно, не может быть быстрым, поскольку обуславливается реакторной и специальной технологией. Тем не менее становится все более определенным, что с помощью ядерных реакторов, действительно, можно осуществить подогрев газа до высокой температуры. Причем следует отметить, что в будущем в высокотемпературных реакторах можно также использовать весьма жаропрочные материалы: молибден, ниобий, тантал и их сплавы. Возможно, эти новые материалы необходимы будут для теплообменников, в которых высокотемпературный гелий из реактора будет подогревать газ, непосредственно используемый в технологическом процессе.

Наконец, целесообразно отметить, что в возможном развитии технологического направления есть одно специфическое ограничение,

которое обуславливается радиоактивностью и в связи с этим необходимостью обеспечения эксплуатации ядерного реактора на высоком уровне. Справедливо считается, что технологических установок с ядерными реакторами не должно быть много и, следовательно, они должны быть большой единичной мощности или иметь значительную тепловую мощность: примерно не менее 1000 МВт. Соответственно мощными должны быть и технологические предприятия.

Поступила в Редакцию 9/IV 1975 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А. П. «Атомная энергия», 1968, т. 25, вып. 5, с. 356.
2. «Brit. Nucl. exportexecutive rev.», 1966, N 1; 1967, N 2; 1968, N 3.
3. Kutter R. IV Intern. Conf., Geneva, 1971, Rep. 49/p./468.
4. «Nucl. Engng Intern.», 1975, v. 20, N 229, p. 412.
5. «Nucl. Engng Intern.», 1974, v. 19, N 219, p. 623.
6. Power and Research Reactors in members States. Vienna, IAEA, 1974.
7. «Appl. Atomics», 1972, N 857; 1973, N 936.
8. «Nucl. Engng Intern.», 1974, v. 19, N 220, p. 689.
9. Electr. Rev., 8/II 1974; Electr. Rev., 25/X 1974.
10. «J. Nucl. Energy», 1972, v. 26, N 1, p. 49.
11. «Brit. Nucl. exportexecutive rev.», 1968, N 3, p. 75.
12. Фейнберг С. М. «Атомная энергия», т. 37, вып. 1, с. 3.
13. Boyer V., Gibbons J. «Nucl. Engng Intern.», 1974, v. 19, N 219, p. 635.
14. «Nucl. Engng Intern.», 1974, v. 19, N 218, p. 566.
15. Красин А. К. и др. IV Женевск. конф., 1971, докл. СССР № 431.

УДК 621. 039 1

## Опыт использования ядерного реактора на Норильском горно-металлургическом комбинате

ВИКИТИН В. Н., ПАВЛОВА В. Н., ПЕТРОВ А. И., ЩЕТИНИН А. М.

Многообразие аналитических задач в производственной практике Норильского горно-металлургического комбината требует постоянного развития, совершенствования и незамедлительного промышленного использования самых современных химических, физико-химических и физических методов исследования элементного состава природного сырья и продуктов его технологической переработки. От быстроты и качества анализа зависит правильная техно-

логия переработки сырья и извлечения металлов, а от чувствительности методов — обнаружение и устранение каналов потерь промышленных ценных элементов [1].

Среди ставших уже классическими физико-химических и физических методов активационный анализ обладает рядом дополнительных возможностей по чувствительности, экспрессности и производительности. Поэтому на комбинате была создана лаборатория активационного

анализа с исследовательским ядерным реактором РГ-1М [2, 3], которая прежде всего должна решать задачи высокочувствительного определения содержания металлов платиновой группы и редких элементов, обеспечивать более высокую производительность анализа геологических и технологических материалов на цветные и породообразующие элементы и проводить радиоизотопные исследования технологических процессов.

Проектная тепловая мощность реактора (5 кВт) в период пуско-наладочных работ была увеличена до 30 кВт [4, 5], и в апреле 1970 г. реактор РГ-1М был введен в строй. В результате реконструкции после двухлетней эксплуатации и проведенных исследований одновременно с монтажом пятиканальной пневмотранспортной системы осуществлено дальнейшее увеличение его мощности [6]. Поток тепловых нейтронов в центре активной зоны реактора теперь составляет  $2,7 \cdot 10^{12}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ , а при использовании ловушки нейтронов — вдвое больше.

Гетерогенный реактор РГ-1М бассейнового типа имеет 11 вертикальных экспериментальных каналов, в десяти поток тепловых нейтронов составляет от 0,4 до  $2,7 \cdot 10^{12}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  и в одном канале поток быстрых нейтронов с энергией более 5 МэВ имеет величину  $10^8$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . Пять каналов оборудованы пневматической системой доставки образцов в реактор и из реактора на позиции выдержки после облучения или измерения. Время облучения, выдержки и адрес доставки образцов в ампулах обеспечиваются автоматически. Пневмотранспортная установка, разработанная и изготовленная ВНИИРТ, показала высокие эксплуатационные качества в течение двух лет. Величина нейтронного потока в каналах реактора и пневмотранспортная установка позволяют с удовлетворяющими промышленным требованиям чувствительностью и точностью проводить нейтронно-активационный анализ в двух вариантах: радиохимическом с использованием долго- и среднеживущих изотопов-индикаторов и неструктуривном, использующем преимущественно короткоживущие активности. Одноменная ежедневная работа реактора оказывается достаточной для облучения анализируемых по производственному плану образцов.

Лаборатория активационного анализа имеет шесть рабочих мест для радиохимической обработки облученных проб в комплексе с двумя сцинтилляционными спектрометрами на базе многоканальных анализаторов импульсов АИ-128 и универсальных сцинтилляционных дат-

чиков УСД-1 и две промышленные установки для инструментального активационного анализа, включающие многоканальные анализаторы импульсов NTA-512 и LP-4840 с набором сцинтилляционных и полупроводниковых Ge(Li)-детекторов. Помимо этого лаборатория оснащена амплитудно-временным анализатором АИ-4096-3м, спектрометром совпадений «Ангара», электронно-вычислительной машиной «МИР-1» и достаточным количеством электронно-физической, радиометрической и дозиметрической аппаратуры.

Большую помощь в оснащении лаборатории современной аппаратурой и оборудованием оказывают комбинату организации ГКАЭ СССР, рассматривая лабораторию активационного анализа НГМК как опытно-промышленный полигон для реализации достижений в области прикладной ядерной физики в народном хозяйстве. На НГМК внедрены и применяются многие приборы и методы, разработанные ВНИИРТ, ведутся совместные научно-исследовательские и методические работы.

За годы опытно-промышленной (с 1972 г. промышленной) эксплуатации в лаборатории разработано и внедрено в аналитическую практику около 20 методик. Характеристики постоянно используемых методик приведены в табл. 1. При решении аналитических задач методами радиоактивационного анализа учитывалось требование большой чувствительности (особенно при определении содержания металлов платиновой группы и редких элементов), чего не доставало ранее применявшимся методам. Радиоактивационный анализ обеспечивает лучшие показатели по производительности и экспрессности и заменяет более трудоемкие классические методы анализа. При этом повышается точность анализа, особенно для промышленных продуктов, по которым составляется технологический баланс. Только использование этого метода дает возможность определять содержание элементов в пробах очень малого веса, в уникальных пробах или в неразрушенных образцах, когда применение других методов невозможно; кроме того, дополняется перечень определяемых элементов.

Преимущества активационного анализа в чувствительности и производительности по сравнению с химическими методами позволили определить две области его промышленного использования: для определения содержания микроколичеств элементов платиновой группы и редких элементов в так называемых бедных продуктах [7, 8] и для массового анализа геоло-

Характеристики методик радиоактивационного анализа

Таблица 1

Определяемый элемент	Порог чувствительности для 5-часового облучения, %	Вес анализируемой пробы, г	Число проб в одной партии	Время анализа одной партии, ч	Производительность проб в неделю
<b>Радиохимический вариант</b>					
Au	10 <sup>-7</sup>	0,5—1,0	18	18	36
Pt	5·10 <sup>-5</sup>	0,2—0,5	6	18	12
Pd	2·10 <sup>-6</sup>	0,2—0,5	6	18	12
Ir	2·10 <sup>-7</sup>	0,5—1,0	20	36	20
Ru	2·10 <sup>-6</sup>	0,5—1,0	20	36	20
Os	5·10 <sup>-7</sup>	0,5—1,0	20	36	20
Re	10 <sup>-6</sup>	0,1—1,0	24	36	24
Ag	10 <sup>-4</sup>	0,1—1,0	30	36	30
<b>Инструментальный вариант</b>					
Cu (в кернах)	10 <sup>-2</sup>	до 200	1—2	0,15	до 200
Co (по <sup>60</sup> Co)	2·10 <sup>-5</sup>	1—2	40—50	168—336	200—250
Co (по <sup>60m</sup> Co)	10 <sup>-3</sup>	0,2—1	2	0,18	200
Si	10 <sup>-1</sup>	0,5—1	2	0,18	200
Al	10 <sup>-2</sup>	1—2	1—2	0,15	240
Au	10 <sup>-4</sup>	1—5	40—50	72—120	200—250
Ir	10 <sup>-5</sup>	1—5	40—50	168—240	200—250

отобранных в районе г. Норильска, выполненная методом неструктивного многоэлементного анализа с применением Ge(Li)-детекторов объемом 60 см<sup>3</sup> и разрешением 3—4 кэВ, позволила количественно оценить содержание более чем 20 элементов, в том числе Hg, As, Se, Te, Co, Ni, Cu, Fe, Cr и др.

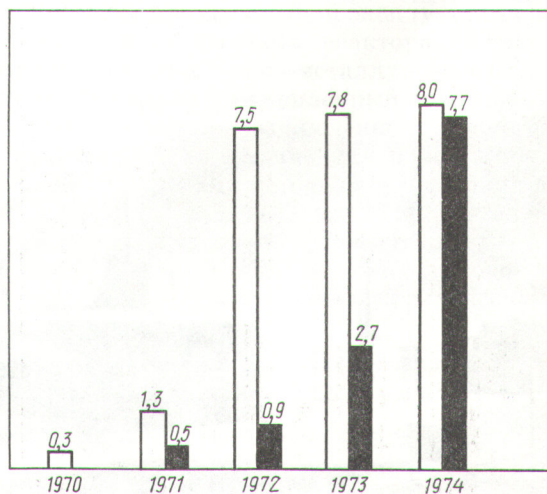
Инструментальное определение содержания самородной меди в образцах керна весом до 200 г позволило уменьшить ошибку, обусловленную непредставительностью навески, используемой в химическом и рентгеноспектральном методах, и потерями металла при измельчении проб.

Применение обоих вариантов нейтронно-активационного метода в аналитической практике Норильского комбината показано на гистограмме (см. рисунок), и в настоящее время рост сдерживается только недостатком лабораторных помещений. С помощью радиоактивных изотопов стало возможным успешно применить два варианта радиоизотопных исследований: введение меченых материалов в производственный процесс с последующим отбором технологических проб для измерений в лабораторных условиях и радиометрические измерения непосредственно на промышленных агрегатах.

Первым способом были исследованы процесс обеднения конвертерных шлаков и поведение благородных металлов при конвертировании никельсодержащего белого мата, когда изучаемые соединения, меченные короткоживущими

гических проб и продуктов среднемесячного технологического опробования на содержание цветных металлов и некоторых элементов силикатной группы. Так, внедрение методик радиохимического определения содержания Ir, Os, Ru и Re существенно дополнило возможности аналитической службы комбината, а использование инструментального активационного анализа руд и промышленных продуктов на содержание кобальта и алюминия значительно увеличило производительность аналитических работ, повысило их качество и сократило сроки.

Достоинства этого метода иллюстрируют определение микроэлементного состава загрязнений окружающей среды, анализ образцов пыли и некоторых промышленных растворов, неструктивный анализ образцов большого веса и пр. Вопросы определения степени загрязнения окружающей среды, влияния отходов медно-никелевого производства на растительный и животный мир Заполярья приобретают в настоящее время особое значение в связи с увеличением объемов промышленного производства. Немалое значение имеют в этих исследованиях возможности активационного анализа. Серия анализов проб снежного покрова,



Радиоактивационные анализы с помощью реактора РГ-1М (тысяч элементопределений):

□ — радиоизотопный анализ; ■ — инструментальный активационный анализ

радиоактивными изотопами Cu, Co, Ni, Au, Pt, Pd, Os, Se и других элементов, были введены в материалы, перерабатываемые в промышленных агрегатах. Анализ отобранных проб помог сделать соответствующие выводы о распределении этих металлов в металлургических продуктах [9].

Во втором случае было выполнено прямое без отбора проб обследование обжига закиси никеля во вращающихся трубчатых печах и даны рекомендации по оптимизации этого технологического процесса. Подобные исследования планируются в дальнейшем.

Первый этап внедрения в промышленность прикладных методов ядерной физики и аппаратуры, сопряженный с преодолением трудностей организационно-технического и психологического характера, можно считать закончившимся успешно. Делая попытку оценить экономическую эффективность комплексного использования ядерного реактора (табл. 2), еще нельзя сказать о значительных достижениях, что

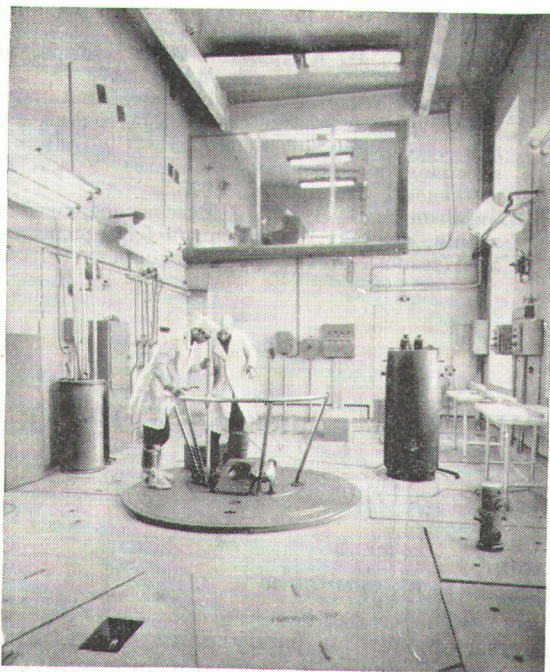
Экономическая эффективность работ, выполняемых на ядерном реакторе РГ-1М, тыс. руб. Таблица 2

Вид работ	1970	1971	1972	1973	1974
Радиохимические анализы	2,0	4,8	31,9	33,0	39,0
Инструментальные активационные анализы	—	2,8	4,5	6,5	18,0
Снижение стоимости облучения проб	—	—	36,0	48,0	67,0
<b>Итого</b>	<b>2,0</b>	<b>7,6</b>	<b>72,4</b>	<b>87,5</b>	<b>124,0</b>

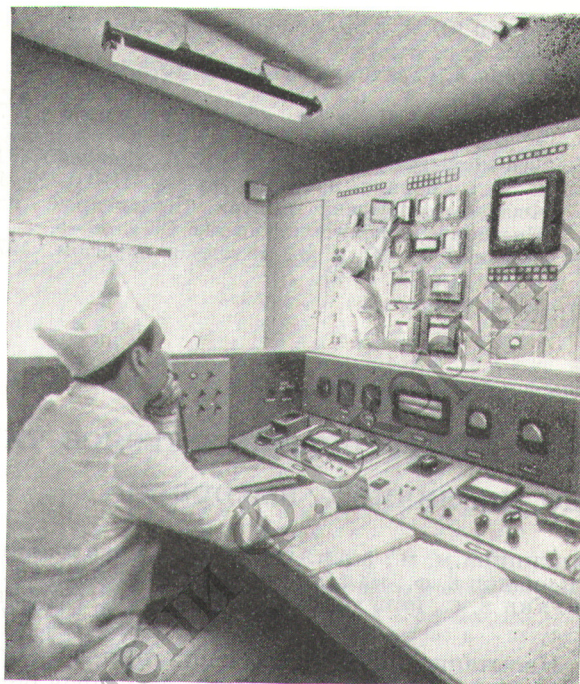
в известной степени объясняется недостаточной полнотой использования всех его возможностей и массового применения активационного анализа в первую очередь из-за отсутствия производственно-экспериментальной базы. Доля актива-



Здание реактора РГ-1М Норильского комбината



Реакторный зал



Пульт управления реактора

ционных анализов (около 20 тысяч элементоопределений в год) по сравнению с общим объемом ежегодных аналитических работ комбината (более 2 миллионов элементоопределений) составляет около 1%; среди же аналогичных работ, выполняемых другими методами, этот вклад составляет уже 5—6%. Отчетливо прослеживаются тенденции роста количества и экономичности работ, выполняемых с помощью реактора, приближение к самоокупаемости ежегодных затрат на содержание лаборатории, что, по нашим прогнозам, будет достигнуто к 1976 г. За 5 лет выполнено более 36 тысяч элементоопределений. Дальнейшее увеличение объема активационных анализов в 10 раз может уже дать годовую экономию около 0,5 млн. руб.

Новая стадия развития активационного анализа и радиозотопных исследований на Норильском ГМК с использованием ядерного реактора РГ-1М предусматривает расширение круга анализируемых промышленных материалов (включая растворы) и увеличение числа определяемых элементов; массовое использование внедренных методик; разработку частично или полностью автоматизированных аналитических циклов с обработкой данных на ЭВМ и в первую очередь многоэлементного инструментального варианта анализа; применение активационного

анализа для исследования растительных образцов, животных тканей и других биологических объектов; проведение анализов для экологических исследований; расширение радиозотопных исследований технологических процессов для их оптимизации и снижения потерь ценных металлов и пр. [10].

Пять лет промышленной эксплуатации исследовательского ядерного реактора на одном из самых крупных горно-металлургических предприятий страны и накопленный опыт позволяют сделать позитивное заключение о перспективности дальнейшего расширения работ с помощью ядерно-физических методов исследования в приложении к задачам цветной металлургии и горно-добывающей промышленности и дает основание для оптимистических выводов об их возрастающем промышленно-практическом значении.

Поступила в Редакцию 3/III 1975 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников Б. И. В сб.: Состояние технологии извлечения и анализа содержания металлов платиновой группы в процессе обогащения медно-никелевых руд. М., изд. ЦНИИинформцветмет, 1967, с. 3.

2. Булкин Ю. М. и др. «Атомная энергия», 1966, т. 21, вып. 4, с. 319.
3. Штань А. С. «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 4, с. 858.
4. Алексеев В. И. и др. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 4, с. 315.
5. Беневоленский А. М., Шенцев В. Т., Щетинин А. М. В кн.: Сборник научных трудов НВИИ № 15. Физико-технический выпуск. Красноярск, изд. Красноярск. политехн. ин-та, 1973, с. 5.
6. Щетинин А. М. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 2, с. 97.
7. Павлова В. Н. и др. «Журн. аналит. химии», 1974, т. 29, вып. 11, с. 2088.
8. Раждаев В. П. и Никитин В. Н. «Журн. аналит. химии», 1974, т. 29, вып. 11, с. 2172.
9. Применение изотопов и ионизирующих излучений в народном хозяйстве Урала. Материалы к докладам III зональной конференции по применению изотопов в народном хозяйстве Урала (тезисы докладов). Свердловск, 1973.
10. Никитин В. Н. В сб.: IX Всесоюзное совещание по химии, анализу и технологии благородных металлов (тезисы докладов). Красноярск, 1973, с. 183

УДК 621.039.542.342:621.039.548

## Испытание опытных твэлов типа БН-600 в реакторе БОР-60 до различных выгораний

АНТИПИНА М. М., БИБИЛАШВИЛИ Ю. К., ГОЛОВНИН И. С., ГРЯЗЕВ В. М., ДЫВЫДОВ Е. Ф., КАЛАШНИК Г. В., МЕДВЕДЕВ А. В., МЕНЬШИКОВА Т. С., МУХИН В. С., ПЕТУХОВ А. А., СУХИХ А. В., СЮЗЕВ В. Н., СЫТОВ Л. И., ТИМЧЕНКО В. Л.

Испытания в БОР-60 опытных твэлов — прототипов твэлов энергетических реакторов большой мощности — завершают работу по созданию конструкции твэла. Эти испытания и послерадиационные исследования позволяют проанализировать эксплуатационные качества конструкции, уточнить или подтвердить принятые конструктивные и технологические решения, а также наметить пути дальнейшей оптимизации твэла.

В настоящей работе представлены обобщенные результаты исследования трех экспериментальных пакетов с твэлами на основе окисного горючего, которые облучались в реакторе БОР-60 до выгорания 4,3; 8 и 10,3 % тяжелых атомов.

Основные конструктивные и тепловые параметры твэлов не отличались от рабочих параметров твэлов БН-600. Однако флюенс нейтронов для оболочек опытных твэлов ниже, чем требуется для твэлов БН-600 ( $\sim 7,5 \cdot 10^{22}$  вместо  $\sim 3,5 \cdot 10^{23}$  нейтр./см<sup>2</sup>). Это отличие достаточно существенно и должно учитываться при анализе результатов испытаний. Все опытные твэлы достигли указанного выгорания без нарушения целостности оболочки и потери герметичности.

Результаты послерадиационных исследований позволили оценить степень и характер химического взаимодействия оболочки и горючего с осколками деления, величину деформации, накапливаемую оболочками за кампанию в результате механического воздействия сердеч-

ника горючего и распухания стали, измерить газовыделение из горючего и определить структурные изменения в сердечнике.

**Конструкция и технология изготовления твэлов.** По основным конструктивным характеристикам (диаметр и толщина оболочки, шаг расположения в пакете, эффективная плотность горючего и плотность спеченных таблеток, зазор оболочка — горючее) экспериментальные твэлы, облученные в реакторе БОР-60, подобны штатным твэлам реактора БН-600 [1].

Конструкция опытного твэла представлена на рис. 1. Наружный диаметр оболочки из стали ОХ16Н15МЗБ электрошлакового переплава 6,9 мм, толщина стенки 0,4 мм. В одной оболочке размещаются активная часть, верхний и нижний отражатели. Длина сердечника активной части в виде спеченных втулочных таблеток из двуокиси урана 90 %-ного обогащения 500 мм. Плотность таблеток 10—10,6 г/см<sup>3</sup>. Номинальное значение эффективной плотности горючего в твэле 8,25 г/см<sup>3</sup>. Верхний и нижний отражатели длиной по 50 мм изготовлены из обедненной двуокиси урана плотностью не менее 10 г/см<sup>3</sup> и непосредственно примыкают к сердечнику активной части.

Таблетки изготовлены методом холодного прессования с применением роторного прессавтомата и последующим спеканием при температуре 1650°С в течение 3 ч в печах с металлическим нагревателем. Перед загрузкой таблеток в оболочку твэла проводились химический, рентгенографический и металлографиче-