

27. А. Ф. Луковников, М. Б. Нейман. «Ж. физ. хим.», 29, 1410 (1955).
28. О. А. Реутов. «Изв. АН СССР. Отд. хим. наук», 6, 684 (1958).
29. О. А. Реутов, Т. Н. Шапкина. «Докл. АН СССР», 133, 381 (1960).
30. М. Н. Гайсинский. Ядерная химия и ее приложения. М., Изд-во иностр. лит., 1961, стр. 569.
31. А. А. Сутягина, К. М. Горбунова. «Ж. физ. хим.», 35, 1769 (1961).
32. Н. А. Балашова, Н. А. Пангаров, З. В. Семенова. «Защита металлов», 2, 80 (1966).
33. Викт. И. Спицын, И. Е. Зимаков, Б. И. Брянцев. «Докл. АН СССР», 175, 875 (1967).
34. И. П. Алимарин. В кн. «Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955)». Т. 15. М., Машгиз, 1957, стр. 79.
35. В. П. Шведов. «Ж. аналит. хим.», 3, 147 (1948).
36. В. Б. Миллер, М. Б. Нейман, П. А. Сазонов. «Ж. аналит. хим.», 7, 269 (1952).
37. G. Nevesy, R. Nobbie. Z. anal. Chem., 88, 1 (1932).
38. И. Е. Старик. «Пробл. сов. геол.», 3, 70 (1933).
39. А. К. Лаврухина. «Ж. аналит. хим.», 10, 203 (1955).
40. В. Г. Хлопин. «Тр. Гос. радиевого ин-та», 4, 34 (1938).
41. Н. А. Богданов, В. Ф. Функе. «Заводск лаборатория», № 2, 181 (1955).
42. G. Seaborg. 155-th ACS National Meeting San Francisco, Calif., April 1-5, 1968 (abstracts of papers).
43. O. Hahn. J. Chem. Soc., Suppl. Iss., No. 2, 259 (1949).
44. К. Б. Заборенко, А. М. Бабешкин, В. А. Беевска. «Радиохимия», 1, 336 (1959); К. Б. Заборенко, А. М. Бабешкин, Л. Л. Мелихов. «Изв. вузов. Химия и хим. технол.», 3, 288 (1960).
45. М. Е. Левина, Б. С. Шершев, К. Б. Заборенко. «Радиохимия», 7, 483 (1965).
46. В. И. Гольданский. «Вестн. АН СССР», № 4, 44 (1966).
47. В. И. Гольданский. Физическая химия позитрона и позитрония. М., «Наука», 1968; Atomic Energy Review, 6, 3 (1968).
48. А. П. Виноградов, Р. В. Тейс. «Докл. АН СССР», 33, 497 (1944); А. П. Виноградов. «Изв. АН СССР. Сер. биол.», № 3 409 (1947).
49. Isotopes in Plant Nutrition and Physiology. Vienna, IAEA, 1967.
50. Isotopes and Radiation in Entomology. Vienna, IAEA, 1968.
51. Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies. Vienna, IAEA, 1967.
52. Isotopes in Hydrology. Vienna, IAEA, 1967.

## Изотопы в промышленности

Е. Е. Кулиш, А. С. Штань

Два десятилетия назад о существовании радиоактивных изотопов знали только ученые-специалисты, в основном физики и химики, а сегодня трудно найти отрасль науки, промышленности, сельского хозяйства и медицины, в которых бы они не применялись.

Получение радиоактивных изотопов не только значительно расширило возможности научных экспериментов во многих областях знаний, вооружив ученых новыми способами активного воздействия на природу, но и создало условия для разработки методов их использования в различных отраслях промышленности.

Методы и аппаратура, основанные на применении радиоактивных изотопов и ядерных излучений, в настоящее время становятся мощным средством технического прогресса.

Применение радиоактивных изотопов в различных отраслях народного хозяйства осуществляется по двум основным методологически отличающимся направлениям: 1) использование радиоактивных изотопов для обнаружения в смеси веществ весьма небольшого количества меченого излучением элемента — метод меченых атомов, или метод радиоактивных индикаторов;

2) использование свойств ядерных излучений и их взаимодействия с веществом.

Радиоактивные индикаторы широко используются при определении термодинамических функций металлургических реакций, изучении кинетики этих реакций и процессов производства стали, установлении механизма выделения примесей при затвердевании стали и сплавов. Выявлено влияние различных факторов на процессы сталеварения в промышленных печах (доменных, мартеновских, электрических), изучено движение шихтовых материалов и газов в доменных печах, проведены наблюдения за расплавлением введенных в жидкий металл ферросплавов и за распределением легирующих элементов в ванне сталеплавильных печей. Важные для теории и практики производства стали результаты получены при исследовании процесса кристаллизации, при выявлении причин брака и снижения качества металла. Радиоактивные индикаторы используются для контроля износа футеровки доменных печей, быстрого определения содержания фосфора в шлаках мартеновских печей и в других случаях.

Применение радиоактивных изотопов существенно расширяет возможности экспериментального исследования процесса изнашивания деталей и узлов машин, поведения смазочных материалов в трущихся частях различных конструкций.

Благодаря высокой чувствительности метода сокращается время проведения опытов и повышается точность получаемых результатов. Наличие большого числа разнообразных изотопов дает возможность выбора изотопа, наиболее удобного для решения поставленной задачи.

Метод меченых атомов позволил по-новому подойти к приготовлению некоторых пищевых продуктов. Так, были изучены процессы созревания сыра и свертывания молока, исследована диффузия хлористого кальция в масле. В спиртовом и пивоваренном производствах с помощью радиоактивных индикаторов был изучен процесс брожения и развития дрожжей.

Широкое применение нашел метод радиоактивных индикаторов в цементной промышленности: впервые удалось установить места присадки золы сланца, доменного шлака и других компонентов, вдуваемых с горячего конца вращающейся печи, место воронки и конденсации щелочей, кинетику износа обмазки и футеровки в зоне спекания.

Этот метод используется и в легкой промышленности при изучении влияния температуры предварительной сушки на характер распределения отделочных соединений в ткани. На Светлогорском и Балаковском комбинатах искусственного волокна был исследован механизм образования вискозных нитей.

Метод меченых атомов все шире внедряется в практику промышленности для решения различных прикладных задач. Наряду с методом радиоактивных индикаторов все большее признание находит в самых различных отраслях промышленности аппаратура для контроля и автоматизации технологических процессов. В этом случае радиоактивные изотопы используются в качестве источников ядерных излучений.

Радиоизотопные методы и приборы успешно применяются для контроля технологических процессов в доменном, сталеплавильном, прокатном производствах, при непрерывной разливке стали, подготовке и агломерации руд на Ждановском металлургическом заводе им. Ильича, Днепровском металлургическом заводе им. Ф. Э. Дзержинского, «Азовстали», Ново-Тулском, Донецком, Енакиевском, Краматорском и других комбинатах.

К настоящему времени изготовлено, смонтировано и передано в эксплуатацию более 70 радиоизотопных установок типа УРМС-2 и УРМС-2М, разработанных Центральным научно-исследовательским институтом черной металлургии им. И. П. Бардина (ЦНИИЧермет) и выпущенных Таллинским заводом контрольно-измерительных приборов (КИП). Кроме контроля и регулирования уровня шихты установки позволяют получать данные о начале расстройств хода плавки, что дает возможность своевременно принимать меры к ликвидации этих расстройств.

По данным некоторых заводов, экономический эффект от применения установок в зависимости от различных условий и объема печей составляет 40—120 тыс. руб. в год на одну установку.

Быстрое развитие техники прокатного производства в направлении повышения скоростей прокатки и снижения допусков по размерам на прокат потребовало разработки новых методов измерения толщины как холодного, так и горячего проката. Использовавшиеся ранее различные контактные, пневматические и индукционные микрометры оказались непригодными. Наиболее перспективным для этих целей явилось применение радиоизотопных приборов. В металлургии широко применяются измерители толщины, основанные на использовании радиоактивных изотопов, испускающих как  $\beta$ -, так и  $\gamma$ -излучение. Хорошо зарекомендовали себя бета-толщинометры типа ИТУ-495 и ИТШ-496 и гамма-толщиномер ИТ-5250, разработанные Центральной лабораторией автоматизации (ЦЛА) и выпускаемые серийно Таллинским заводом КИП.

В настоящее время на заводах черной металлургии находится в эксплуатации более 100 указанных измерителей толщины. Их применение дает значительную экономию в результате увеличения производительности прокатных станов, сокращения брака по толщине, сокращения плюсового допуска на прокат, снижения себестоимости продукции. Практически все лудильные агрегаты страны оснащены радиоизотопными измерителями толщины оловянного покрытия жести (ИТП-476), которые используются как для контроля в процессе лужения, так и для сортировки готовой продукции. Благодаря их применению время на контроль сокращено более чем в 10 раз, повышена точность измерения, сокращен расход олова. Средняя величина экономии, приходящаяся на один прибор, составляет около 65 тыс. руб. в год.

В металлургической промышленности широкое развитие получил прогрессивный метод непрерывной разливки металла. Один из важных технологических параметров процесса — уровень жидкого металла в кристаллизаторе, от постоянства которого в значительной мере зависит качество слитка. На базе радиоизотопного датчика уровня Киевским институтом автоматки и ЦЛА разработаны системы автоматического регулирования уровня жидкой стали в кристаллизаторе установок непрерывной разливки (ГУМ-008 и РУ-5545), обеспечивающие постоянство уровня в пределах  $\pm 10$  мм.

Радиоизотопные регуляторы уровня внедрены на Ново-Липецком и Донецком металлургических заводах, Горьковском и Пермском машиностроительных заводах, заводах «Сибэлектросталь» и «Амурсталь». Проектами предусматривается применение радиоизотопных регуляторов уровня на всех вновь строящихся установках непрерывной разливки стали.

Надежность радиоизотопной аппаратуры и ощутимый технико-экономический эффект от ее применения послужили хорошей рекомендацией, благодаря которой она завоевала признание и доверие горняков. Это можно показать на примере Украинской ССР.

На угольных шахтах и обогатительных фабриках Украины эксплуатируется около 1000 радиоизотопных устройств. На отдельных шахтах применяется 50—60 приборов. Оснащение скиповых подъемов радиоизотопной аппаратурой предотвращает такие крупные аварии, как обрыв скипов при переполнении подъемного бункера и напуска каната. Устранение подобных аварий на шахте обходится государству в 40—70 тыс. руб. Радиоизотопные приборы не только предотвращают аварии, но и дают возможность ввести скип в автоматический режим, увеличить производительность благодаря сокращению цикла подъема груза, уменьшить расход электроэнергии и сократить обслуживающий персонал. Радиоизотопная автоматизация одного скипового подъема дает экономию 3,3 тыс. руб. в год. В настоящее время работу скиповых установок контролируют 550 радиоизотопных приборов. На угольных предприятиях Украины 130 гамма-релейных приборов используются для контроля нижнего уровня в угольных и породных бункерах. Благодаря этому улучшаются условия труда шахтеров в забое, лучше обеспечивается безопасность работ.

С помощью радиоизотопной аппаратуры осуществлена автоматизация конвейерных линий,

автоматизирована работа канатных дорог, осуществлены схемы автоматической разгрузки осадочных машин. Экономический эффект составляет 6,3 тыс. руб. на одну машину. Работа погрузочного комплекса, лебедок терриконников, пневмообрушения в аккумулирующих бункерах контролируется и автоматизируется с помощью радиоизотопной аппаратуры. Автоматизация пневмообрушения дала возможность увеличить производительность Брянской центральной обогатительной фабрики и получить годовую экономию 23 тыс. руб.

Радиоизотопная аппаратура широко применяется в химической промышленности для измерения и контроля уровня жидких и сыпучих материалов, измерения плотности жидкостей (растворов и пульп), для анализа жидких и газообразных сред, для измерения толщины различных листовых и ленточных материалов, для контроля толщины стенок технологических аппаратов и трубопроводов и в других случаях. Например, на Северодонецком химическом комбинате работают свыше 100 радиоизотопных приборов в схемах контроля и регулирования технологических процессов. Средний годовой экономический эффект от применения этих приборов достигает 100 тыс. руб. Большой опыт эксплуатации радиоизотопной аппаратуры накоплен на химических заводах. Использование индикаторов уровня для автоматического управления процессом плавки каустика позволило получить годовую экономию 28 тыс. руб. Успешно применяются радиоизотопные приборы на Чапаевском заводе химических удобрений.

Все большее применение в химической промышленности находит толщиномер ТОР-1, разработанный во Всесоюзном научно-исследовательском институте радиационной техники (ВНИИРТ). Этот прибор позволяет измерять стенки трубопроводов и емкостей при одностороннем доступе, не требует особой чистоты обработки поверхности в месте измерения. С помощью этого прибора можно проводить профилактический контроль коррозии стенок объектов без остановки технологического процесса.

Важная особенность химико-технологических процессов состоит в том, что для их контроля и управления необходим оперативный анализ состава основных производственных продуктов. Наибольшее распространение для этих целей получили приборы, в которых измеряются эффекты поглощения и отражения анализируемой средой  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -излучения. В ОКБ автоматки разработан анализатор состава

трехкомпонентных жидкостей АТЖ-2, основанный на одновременном измерении ослабления и отражения жидкостью пучков  $\beta$ -частиц от источника из  $\text{Sr}^{90} + \text{Y}^{90}$ . Модификации этого прибора позволяют контролировать  $\text{NaOH}$  и  $\text{NaCl}$  в электролитической щелочи производства хлора методом диафрагменного электролиза. По предварительным расчетам, экономический эффект от внедрения комплекса из двух приборов оценивается в 37 тыс. руб. в год.

Радиоизотопные методы и аппаратура применяются для контроля примесей в органических жидкостях. На ряде заводов успешно эксплуатируется прибор АЖС-1 для непрерывного определения серы и хлора непосредственно в технологическом потоке.

Находят применение в промышленности радиоизотопные концентратомеры. Так, например, концентратомер РК-1, разработанный в Уральском научно-исследовательском институте химического машиностроения, предназначен для контроля в растворе элементов с порядковыми номерами в интервале 24—30 (хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь, цинк) на фоне элементов с меньшими номерами. Во ВНИИРТе создан концентратомер калия КРК-2 для измерения концентрации хлористого калия в дробленой сильвинитовой руде, концентрате и растворах.

Значительное развитие в СССР получили разнообразные методы ионизационного газового анализа. Широко распространен метод хроматографического анализа с использованием детекторов, в которых ионизация газов (и паров) осуществляется  $\beta$ -излучением от источников из  $\text{Sr}^{90}$ ,  $\text{Pm}^{147}$  и трития.

Радиоизотопные методы открывают большие перспективы для решения одной из центральных аналитических проблем современных химических предприятий — контроля загрязненности атмосферы производственных помещений газами. Наибольшее развитие получает в этой связи так называемый аэрозольно-ионизационный метод. В ОКБ автоматики разработан аэрозольно-ионизационный газоанализатор типа «Сигма», с помощью которого можно контролировать аммиак, хлористый водород, аммиак, окислы азота. Имеется опыт успешной эксплуатации этого прибора на химических заводах.

С развитием металлургии, машиностроения, судостроения увеличилась толщина слитков, сварных, литых и других конструкций. Возникла необходимость в контроле изделий из стали и специальных тяжелых сплавов толщиной до 200 мм и выше. Эту задачу успешно решает

метод  $\gamma$ -дефектоскопии с использованием радиоизотопных источников жесткого  $\gamma$ -излучения  $\text{Co}^{60}$ . Контроль изделий сложной конфигурации и труднодоступных мест ответственных конструкций, а также контроль в полевых и специфических условиях обеспечивается  $\gamma$ -дефектоскопическим методом с применением источников излучения на основе таких искусственно-радиоактивных изотопов, как  $\text{Cs}^{137}$ ,  $\text{Ir}^{192}$ ,  $\text{Eu}^{152-154}$ ,  $\text{Se}^{75}$ ,  $\text{Tl}^{170}$ ,  $\text{Ce}^{144}$ .

Этот метод в настоящее время стал одним из основных методов неразрушающего контроля материалов и готовых изделий с большим диапазоном толщин, эквивалентных толщинам стали от 0,5 до 200—250 мм.

Большой вклад в решение этой проблемы внесли коллективы МВТУ им. Баумана, Научно-исследовательского института авиационной технологии, Всесоюзного института авиационных материалов, ЦНИИЧермета, завода «Мосрентген» и др. За минувшее 20-летие научно-исследовательскими организациями и промышленными предприятиями создан ряд уникальных и серийных гамма-дефектоскопических аппаратов.

В последние годы активную работу в этой области ведет ВНИИРТ. Решены многие задачи по созданию инженерных методов расчета оптимальных параметров гамма-дефектоскопических аппаратов. Эти методы используются в процессе разработки новой аппаратуры для радиографического контроля. Разработаны и переданы в серийное производство аппараты РИД-21 и РИД-22 нормального ряда классификации СЭВ. Завершается разработка аппаратов РИД-11 и РИД-33. Разработаны и переданы на освоение в серийное производство аппараты «Лабиринт», «Газпром», «Трасса», «Нева» и др.

В настоящее время в стране эксплуатируется свыше 3000 гамма-дефектоскопических аппаратов различных типов, которые приносят народному хозяйству ежегодно свыше 30 млн. руб. экономии.

Специфика легкой и особенно текстильной промышленности, а именно нежелательность, а часто и невозможность контакта измерительного устройства с контролируемыми материалами, средой или агрегатом, создает благоприятные условия для применения радиоизотопных методов и аппаратуры в этой отрасли.

В легкой промышленности нашли применение релейные радиоизотопные приборы, терморегуляторы, позиционные регуляторы уровня, счетчики предметов. Так, например, разработанный Центральным научно-исследователь-

ским институтом хлопчатобумажной промышленности (ЦНИХБИ) радиоизотопный регулятор типа РРУ-3 применяется для контроля и регулирования уровня ткани в запарных и варочных аппаратах отбельных агрегатов на многих отделочных фабриках и установках приготовления шпихты на ткацких фабриках.

Минским СКБ текстильной и легкой промышленности модернизировано серийное радиоизотопное реле и внедрено на Минском комбинате для регулирования уровня шерсти в приемных бункерах чесальных машин в системе поточной линии изготовления чесальной ленты. Внедрение указанных линий позволяет повысить производительность труда на камвольных предприятиях в 1,5—2 раза.

В последние годы на отделочных фабриках в СССР начали внедряться химические станции приготовления различных растворов и красителей для восстановления отработанного каустика и других целей. Эти станции, как правило, включают большое число резервуаров: реакторов, котлов, мерников и т. п. Для автоматизации химических станций ЦНИХБИ разработана регулирующая многопозиционная система радиоизотопных индикаторов уровня, которая может быть использована для позиционного контроля и регулирования уровня жидкости в 18 различных точках или на 18 объектах (резервуарах) одновременно. По данным Первой московской ситценабивной фабрики, применение указанной системы дает экономический эффект более 6000 руб. в год. Государственный проектный институт Министерства легкой промышленности СССР включил эту радиоизотопную систему в проекты химических станций реконструируемых и вновь строящихся предприятий текстильной промышленности.

Важное значение в текстильной промышленности имеет равномерность полуфабрикатов (холста, ленты, ровницы) и пряжи. ЦНИХБИ совместно с Таллинским заводом КИП разработали радиоизотопный прибор для контроля массы волокнистого слоя (холстов) на трепальной машине. Эксплуатация приборов на хлопчатобумажных комбинатах «Балтийская мануфактура», «Трехгорная мануфактура» и Алма-Атинском показала, что их применение позволяет резко повысить производительность труда и качество выпускаемой продукции.

Радиоизотопная аппаратура позволяет успешно решать многие важные проблемы контроля и автоматического регулирования технологических процессов в целлюлозно-бумажной промышленности. Вес 1 м<sup>2</sup> бумаги или картона

является одной из важнейших технических характеристик, определяющей оптимальный расход дорогостоящего волокна на изготовление готовой продукции. Разработанная в Рижском научно-исследовательском институте радиоизотопного приборостроения совместно с ЦКБ Министерства целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности ЛатвССР и Украинским научно-исследовательским институтом целлюлозно-бумажной промышленности радиоизотопная аппаратура для измерения и регулирования веса 1 м<sup>2</sup> бумажного и картонного полотна успешно и эффективно применяется в промышленности. Пионером в освоении этой аппаратуры является Красногородская ордена Ленина бумажная фабрика. Годовой экономический эффект от применения аппаратуры только на одной машине этого комбината составляет 58 тыс. руб.

В бумажной промышленности используется 50 комплектов радиоизотопной аппаратуры, экономия от их применения составляет примерно 2 млн. руб. в год.

В настоящее время трудно найти отрасль промышленности, которая бы в той или иной степени не встречалась с явлением статической электризации. Наибольшие производственные трудности электризация создает в текстильной, бумажной, полиграфической резино-технической, химической промышленности и в некоторых других. Для защиты от зарядов статического электричества наибольшее распространение получили радиоизотопные нейтрализаторы, которые по сравнению с электрическими и индукционными имеют многие технические и эксплуатационные преимущества: отсутствие электрических источников питания, удобство монтажа и эксплуатации, высокая надежность и большой срок службы, возможность применения в пожароопасных цехах и др.

ЦНИХБИ и Институтом физики АН УССР в содружестве с производственными предприятиями разработаны и серийно выпускаются радиоизотопные нейтрализаторы на основе Pu<sup>239</sup>, Pm<sup>147</sup> и трития. В последние годы наблюдается непрерывный рост выпуска и объема внедрения радиоизотопных нейтрализаторов в различные отрасли промышленности:

Год	Число
1964	~800
1965	~2700
1966	~3600
1967	~5600

В текстильной промышленности радиоизотопные нейтрализаторы применяются на че-

сальных, гребнечесальных, ленточных, сновальных, шпихтовальных, чистильно-стригальных, сушильно-ширильных, ворсовальных, пропиточных, браковочно-мерильных и других машинах при переработке натуральных и химических волокон; в полиграфической промышленности — на листорезальных, флаторезальных и печатных машинах; в резино-технической промышленности — на клеепромасочных, дублировочных машинах и на разбраковочных столах. Они применяются также в химической, киношпелочной, деревообрабатывающей и других отраслях промышленности.

Для иллюстрации эффективности радиоизотопных средств нейтрализации статических за-

рядов приведем только один пример. Годовая экономия от применения радиоизотопных нейтрализаторов в текстильной промышленности составила: на комбинате им. Щербакова — 80 тыс. руб., на Наро-Фоминском комбинате — 50 тыс. руб., на Черниговском комбинате — 250 тыс. руб.

Приведенные примеры далеко не исчерпывают всех интересных и важных работ и направлений использования изотопов в промышленности. За прошедшие 20 лет изотопные методы, приборы, аппараты и установки внедрены в различные отрасли промышленности и стали мощным оружием в борьбе за научный и технический прогресс.

## Ядернофизические методы анализа

И. П. АЛИМАРИН, Ю. В. ЯКОВЛЕВ

За последние 10—15 лет ядернофизические методы анализа из уникальных, слабо развитых и малораспространенных методов, своего рода «аналитических курьезов», превратились в одно из самых мощных средств решения современных аналитических проблем — определения ультрамалых количеств примесей в чистых веществах, следов элементов в геологических и биологических объектах, а также экспрессного контроля технологических процессов.

Развитие современной науки и техники характеризуется быстрым ростом требований к чистоте материалов и к определению следов элементов, а следовательно, и к чувствительности методов анализа (рис. 1). Так, в конце 30-х — начале 40-х годов металлургия и геология ставили задачу определения примесей в количествах  $10^{-2}$ — $10^{-3}\%$ , в конце 40-х — начале 50-х годов атомная промышленность требовала определения  $10^{-4}$ — $10^{-6}\%$  примесей в конструкционных материалах; развитие полупроводниковой техники за последнее десятилетие было бы совершенно невозможным без разработки методов контроля содержания примесей в интервале  $10^{-6}$ — $10^{-8}\%$ , а впереди еще более грандиозная задача создания методов получения и анализа материалов для термоядерной энергетики с содержанием примесей  $\sim 10^{-10}\%$ .

В то же время основным направлением развития современной аналитической химии можно назвать тенденцию развития методов «от периферии к центру атома» (рис. 2). Так, на смену классическим химическим, физико-химическим и физическим методам, основанным на использовании свойств внешних электронов

(колориметрия, спектрофотометрия, полярография, спектральный анализ) и внутренних электронных оболочек (рентгеноспектральный анализ), приходят методы, основанные на свойствах ядер атомов (масс-спектрометрия, ядернофизические и радиохимические методы), обладающие в целом более высокой чувствительностью и экспрессностью.

К аналитическим методам, основанным на протекании ядерных реакций и использовании

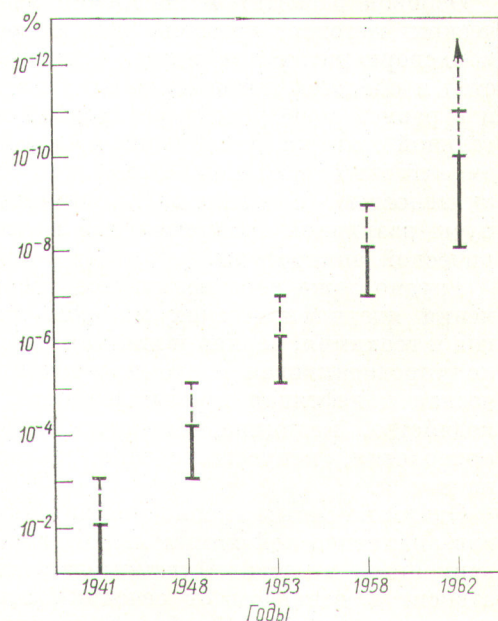


Рис. 1. Чувствительность определения примесей в чистых веществах: — достигнуто; ---- — требуется.