

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ***Дж. Ирвин*)*

В непрерывно расширяющийся арсенал экспериментальной техники радиоэлементы внесли свой вклад в виде двух важных орудий исследования. Подобно тому как это часто бывало и в прошлом, эти орудия исследования быстро перешли из «чисто» научных лабораторий в сферу прикладной исследовательской работы и в настоящее время уже начат переход в область техники.

Первое и, пожалуй, наиболее важное орудие — это возможность метить атомы и молекулы. Подобная индикация даёт средство анализа, не имеющее себе равных в отношении чувствительности и определённости получаемых результатов. Второе орудие представляет собой источник излучений высокой энергии, обладающий малыми размерами, портативный и не нуждающийся во внешнем источнике энергии.

ИНДИКАТОРНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Более близкое ознакомление с возможностями использования радиоэлементов показывает, что можно отличить две категории их использования в качестве меченых атомов, а именно: химическую и физическую индикацию. В химических работах приходится иметь дело с радиоизотопами того элемента, химические свойства которого изучаются. Элемент, содержащий изотоп, вводится в соответствующий ион или молекулу или же применяется в чистом виде или в виде одной из компонент сплава. Этот материал далее добавляется к изучаемой системе и все физические и химические изменения меченого вещества прослеживаются в предположении, что поведение радиоизотопа в точности отражает поведение меченого элемента.

В качестве примера этого типа индикации укажем на работу, в которой исследовалось распределение фосфора в шлаке и стали.

*) *Analytical Chemistry* 21, 364 (1949). Сокращённый перевод Л. Белла.

Фосфорнокислый кальций, содержащий P^{32} , добавлялся к шлаку. Скорость появления P^{32} в стали характеризует скорость установления равновесия фосфора в обеих фазах (рис. 1). Определяя химическим путём общее количество фосфора, можно найти постоянную установления, могут быть исследованы влияющие на равновесие и скорость его установления факторы, такие как температура, относительное содержание кальция и фосфора и т. д. ²⁴.

Физическая индикация, т. е. изучение массового переноса материала, может быть осуществлена путём введения радиоизотопа

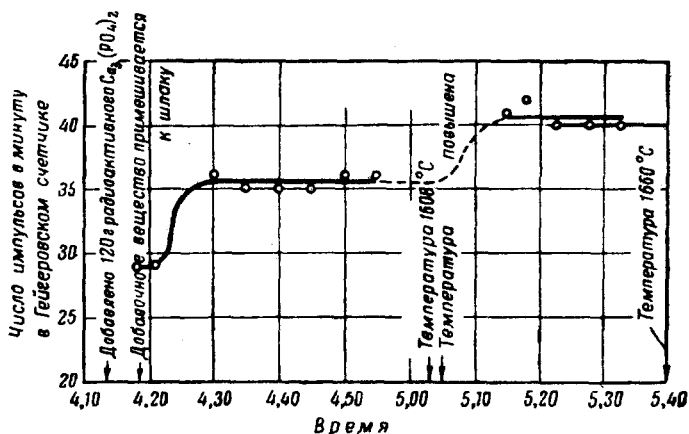


Рис. 1. Распределение фосфора между шлаком и сталью²⁴. Легко определить скорость установления равновесного распределения между обеими фазами. Показано также влияние температуры на равновесие.

любого из элементов, составляющих систему. В этом случае, очевидно, возможности выбора радиоэлемента значительно шире. Если не происходит химических реакций или изменения фазы изучаемой компоненты, то любой радиоактивный элемент, обладающий подходящими свойствами, может быть введен в систему. Благодаря большой чувствительности этих аналитических методов, можно концентрацию постороннего материала сделать настолько малой, чтобы она существенно не влияла на свойства системы.

Примером физической индикации может служить использование радиомарганца для определения распределения ДДТ по поверхности земли при пульверизации с низколетящих самолётов. Растворимое в масле соединение марганца (Mn^{52} выбирался из-за подходящих свойств его лучей и удобного периода полураспада) примешивалось к стандартному составу ДДТ. Этим способом можно было легко измерять количества ДДТ, не превышающие 25 г

на гектар. Красители или другие дополнители также могут быть использованы для тех же целей, но радиоактивный метод предпочтителен вследствие его высокой чувствительности и удобства. Из-за летучести масла-растворителя невозможно изучать его поведения при разбрызгивании. Вообще, отделение индикатора от изучаемого вещества не должно иметь места при подобных исследованиях.

ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЙ

В работах с мечеными атомами основной упор делается на вещество, испускающее лучи; излучение же используется лишь для проведения самих измерений. При использовании радиоэлементов в качестве источников радиации положение меняется на обратное. Теперь природа самого вещества относительно безразлична и основной интерес представляют излучения и производимые ими эффекты.

Использование подобных источников радиации может идти по двум линиям. В одном случае важно воздействие излучения на вещество. Как известно, излучения от радиоактивных элементов производят ионизацию в любом веществе, через которое они проходят. Это свойство использовалось, например, для удаления электростатических зарядов, образующихся на движущихся изоляторах; подобный случай имеет место при производстве бумаги и тканей². Удаление зарядов происходит вследствие их утечки в ионизованный воздух, соприкасающийся с движущимися материалами. Этим избегается искрение и тем самым ликвидируется опасность возникновения взрывов пыли или паров.

Другой метод использования радиоактивных источников основан на действии вещества на излучения (в отличие от действия радиации на вещество). Основой этого метода является поглощение лучей в материале, помещённом между источником и детектором. Поскольку уменьшение интенсивности пучка лучей зависит от поглотителя, то степень этого уменьшения может служить мерой толщины последнего. На этом принципе изготовлен измеритель толщины пластмассовых плёнок⁵. Так как измеряемый материал не подвергается никакому механическому воздействию, то удаётся измерять очень мягкие пластмассы без опасности деформации их в самом процессе измерения (рис. 2). Этим методом можно также измерять толщину движущихся плёнок и этот метод пригоден поэтому для контроля различных технологических операций.

Прежде чем рассмотреть многочисленные примеры промышленного применения радиоэлементов будет целесообразно точнее определить, что именно будет подразумеваться под выражением «промышленное применение». В данной статье под этим термином мы будем понимать использование радиоэлементов в исследованиях

или изысканиях, непосредственная цель которых состоит в создании, улучшении или контроле производственных процессов или промышленной продукции. Очевидно, что и любое исследование, приводящее к лучшему пониманию технологического процесса,

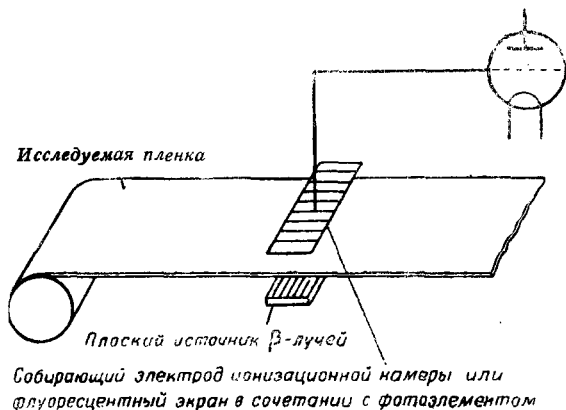


Рис. 2. Схематическое изображение измерителя толщины тонких плёнок². В зависимости от природы измеряемой плёнки может быть взят источник, испускающий α-, β- или γ-лучи.

также должно быть включено сюда, поскольку углублённое понимание приводит в конечном счёте к практическим последствиям.

ПРИМЕРЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Индикаторные применения

Приводимые ниже примеры промышленного применения радиоэлементов имеют целью иллюстрировать различные случаи исследования технологического процесса в заводских и лабораторных условиях, а также и случаи контроля технологического процесса и готовой продукции. Много писалось о возможных практических применениях радиоэлементов, кое-что известно о ведущейся работе, но очень мало сообщалось о вполне законченных работах. Чтобы избежать сомнительных данных, речь в дальнейшем пойдёт только о последних двух категориях работ.

Одним из главных источников нежелательной примеси серы в стали является кокс, используемый в доменной печи. Сера встречается в угле в двух различных видах — колчедановом и органическом, и отношение этих двух видов зависит от сорта угля. Поэтому было желательно установить, какой именно тип серы переносится из угля в кокс. Если бы оказалось, что какой-то один

из видов серы в меньшей степени, чем другой, переносится в кокс, то тем самым появилась бы возможность контролировать состав окончательного продукта путём разумного выбора исходного материала. Так как нелегко создать в лаборатории условия, подобные тем, которые встречаются в коксовальной печи, то пришлось произвести опыты в заводских условиях^{7, 16}.

Серный колчедан, содержащий S^{35} , синтезировался в лаборатории и затем хорошо перемешивался с 12 тоннами угля. Это ко-

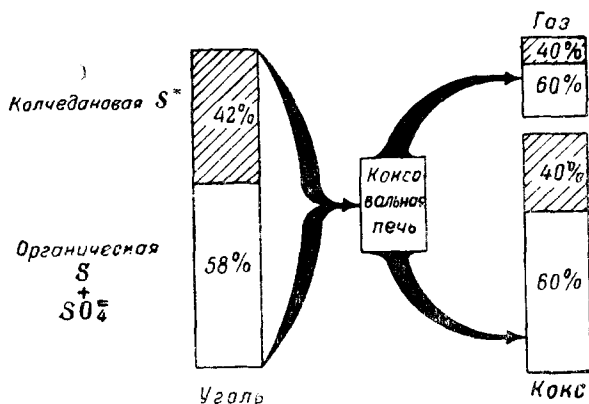


Рис. 3. Схематическое изображение поведения серы при коксовании. Колчедановая сера (S^*) мечена индикатором S^{35} .

личество угля представляет собой ровно одну загрузку коксовальной печи.

Во время коксования тщательно измерялось выделение газов и через правильные промежутки времени исследовалось общее и радиоактивное содержание серы в газе. По окончании коксования также проводились анализы на общее и радиоактивное содержание серы в типичных образцах продукта. Эти опыты показали, что отношение радиоактивной (колчедановой) серы к общему её количеству было одинаково в газе и коксе и равнялось отношению колчедановой серы к общему количеству серы в исходном угле. Этот результат интерпретировался в том духе, что при коксовании оба типа серы в угле эквивалентны и их соотношение в угле не влияет на содержание серы в готовом коксе (рис. 3).

Большая серия лабораторных исследований проводится и в нефтяной промышленности. Естественно, что главный интерес представляет механизм реакций, происходящих при обработке нефти¹⁰. Каталитический крекинг и синтез изучаются с различных сторон. Исследование прохождения трёхфазной системы нефть — вода — газ через пористые среды должно привести к лучшему пониманию некоторых проблем, связанных с производством нефти¹.

Изучается также механизм трения и роль смазочных материалов^{4, 12, 20, 21}. Известно, что при трении двух металлических поверхностей с каждой из них происходит перенос некоторого количества металла на вторую поверхность. Если одну из поверхностей сделать радиоактивной, то можно измерить количество перенесенного материала даже в том случае, когда поверхности состоят из одного и того же металла, хотя бы и очень твердого, как в случае хромированной или нитрированной стали (рис. 4). Когда трущиеся поверхности смазаны, перенос металла уменьшается, но

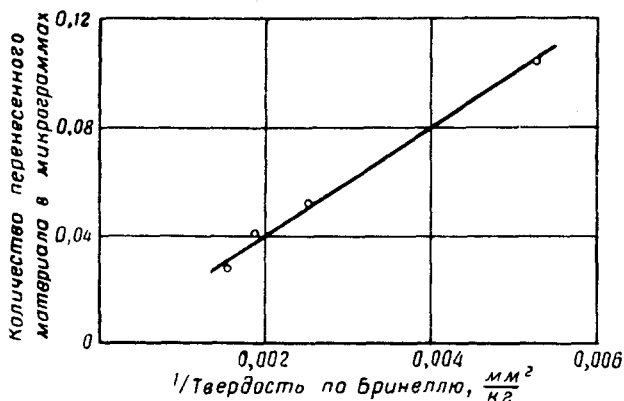


Рис. 4. Перенос бериллиево-медного сплава на стальной шарик как функция твердости бериллиево-медного сплава²⁰.

не прекращается. Получены данные также и о роли добавочных элементов в смазочных материалах.

Смазочные вещества также используются для текстильных материалов с целью улучшения прядильного и ткацкого процессов. В одном случае требовалось определить распределение смазочного материала на вязкой пряже. Трудности, возникавшие при прядении и крашении, указывали на возможную неравномерность распределения смазки и в результате была предпринята попытка измерить это распределение. Смазка содержала олеиновокислый натрий; поэтому в смазку вводился радионатрий в виде этого соединения. Обработка пряжи производилась в лабораторных масштабах и измерение радиоактивного натрия производилось над образцами, имевшими в некоторых случаях длину не больше одного сантиметра. Поскольку пряжа была 150-дене (150 граммов на 9000 метров), то такие образцы имели вес всего порядка 0,2 мг, и каждый образец содержал всего около 0,04 мкг натрия (рис. 5). Лабораторные испытания указали на высокую равномерность распределения натрия, но поскольку последний служил в качестве

«физического индикатора», то нельзя было отсюда делать вывода о равномерном распределении других компонентов смазочного материала. Эти испытания, однако, иллюстрируют чрезвычайно высокую чувствительность такого аналитического метода.

Подобное же исследование производилось над количеством типографской краски, откладываемой при печатании³. Небольшое количество лака, используемого в краске, фосфоризировалось с пятихлористым фосфором, содержащим P^{32} , и потом применялось к краске. После этого полученная краска использовалась для печатания. Прямое измерение β -излучения дало меру количества отложенной краски. Подобные измерения позволяют связать качество печатания с количеством использованной краски. Кроме того, можно изучить и влияние качества бумаги и температуры печатания.

В литературе появлялись краткие сообщения и о других применениях радиоэлементов для исследования технологических процессов, но без изложения результатов. Так, в настоящее время радиосера используется для изучения механизма вулканизации резины и действия модификаторов при производстве синтетического каучука. Радиофосфор используется для исследования скорости диффузии пластификаторов в пластмассах и также для определения количества и места нахождения фосфора в стали¹. Радиоуглерод и ряд радиоактивных металлов используются в ряде металлургических исследований^{14, 15, 23}.

Радиоэлементы также играют заметную роль в изыскании новых продуктов питания.

В одном случае, например, требовалось испытать действие различных минеральных соединений, добавленных к соли, предназначенной для животных¹⁷. При этом искался оптимум между растворимостью соединения в воде и степенью его усвоения животным. Слишком растворимые добавки вымывались бы, а мало растворимые соединения не могли бы быть усвоены с полной эффективностью. Радиоактивные иод, медь и железо в различных видах были введены в пищу животных. После этого через определённые

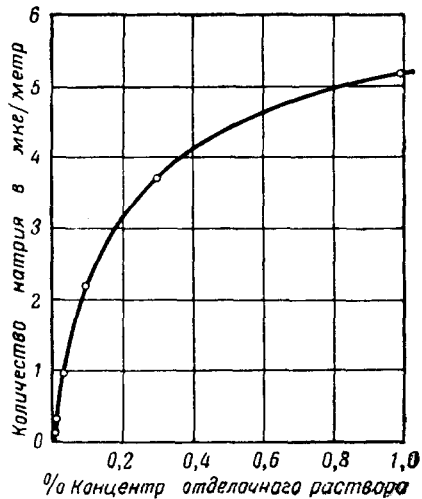


Рис. 5. Вес натрия в вискозной пряже как функция концентрации отделочного раствора. Радионатрий добавляется к раствору в виде олеиновокислого натрия.

промежутки времени производились анализы мочи, экскрементов и крови на радиоактивность, а также определялась скорость обмена веществ. Этим методом удалось установить, что диноддитимол является подходящим соединением для введения иода, в то время как фосфат железа, например, плохо усваивался животными из-за его малой растворимости. В результате этих испытаний для каждого из добавляемых к соли элементов было выбрано подходящее соединение.

В области биологии и медицины таких примеров создания новых продуктов немало. Нередко подобная работа даёт результаты, имеющие значительно более фундаментальное значение, чем простое улучшение качества продуктов^{13, 19}.

Радиоактивные индикаторы использовались также для контроля технологического процесса в целях получения данных по охране труда.

В качестве примера приведём случай отравления, имевший место на одном заводе люминесцентных ламп. Пострадавшая работница припаивала лампы перед их откачкой. Лампа при этом содержала небольшое количество ртути и требовалось определить то количество ртути, которое вдыхалось при отпайке. С помощью радиоактивной ртути было выяснено, что средняя концентрация паров ртути в установке для отпайки составляла 0,01 мг на кубический метр, что составляет меньше 10% максимально допустимого значения. В этих измерениях количество ртути иногда не превышало 10^{-8} г.

Радиоэлементы также использовались для исследования течений загрязнённых рек¹⁰.

Можно было бы привести и другие примеры индикаторных применений, но эта область настолько нова, что число опубликованных работ ещё очень мало.

ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЙ

Использование радиоэлементов в качестве источников излучений непрерывно ширится. До появления радиоэлементов, получаемых в котле, наибольшее значение в этой области имел радий и в настоящее время он всё ещё широко применяется. Применения, основанные на ионизации, создаваемой излучениями, были упомянуты выше в связи с задачей устранения статических зарядов. Светящиеся составы для циферблатов часов или шкал измерительных приборов основаны на ионизации, создаваемой в люминесцирующих составах. Менее известно применение радиоэлементов в качестве непрерывно действующих источников ионов в газоразрядных трубках. Некоторые радиолокационные приборы требуют, чтобы задержка зажигания в соответствующих газоразрядных трубках была меньше доли микросекунды. Отсутствие ионов в газе

трубки может привести к запаздыванию зажигания, превышающему это значение в тысячи раз. Введение малых количеств радия

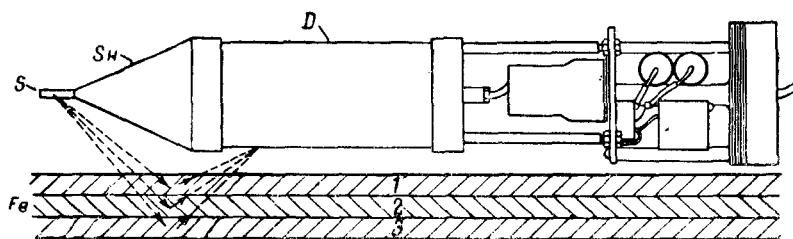


Рис. 6. Схематическое изображение устройства для измерения толщины труб⁸. *S* — источник γ -лучей (например Ra). *SH* — свинцовый экран для защиты ионизационной камеры *D* от прямого попадания лучей от источника.

или Co^{60} в трубку обеспечивает постоянное присутствие ионов и тем самым быстрое и надёжное действие трубки. Было предпринято несколько попыток использования этого метода для стартеров люминесцентных ламп.

Другое общее применение источников излучений основано на зависимости количества радиации, попадающей в детектор, от расстояния между последним от её источником, или и материала, находящегося между ними. Сюда относится радиография больших металлических отливок. Широкое применение в этой области нашли радий, радон и Co^{60} ¹⁸. Дефекты в отливках определяются по особо тёмным участкам фотоплёнки, обусловленным меньшим поглощением лучей в местах дефекта. Упомянутый выше измеритель толщины также действует на этом принципе дифференцированного поглощения лучей. В последнем случае, однако, применяется электронный метод регистрации вместо фотографического.

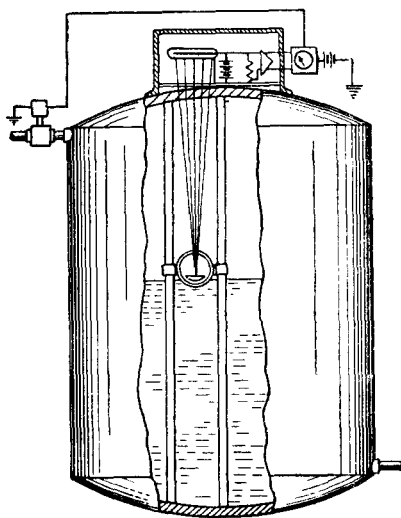


Рис. 7. Поплавковый измеритель уровня жидкости²³. Источник γ -лучей, например Ra или Co^{60} помещается в полый поплавок в резервуаре. Лучи обнаруживаются с помощью счётчика или ионизационной камеры, помещёнными поверх резервуара. Ток от детектора приводит в действие клапан, регулирующий высоту уровня жидкости.

Другой тип измерителя толщины основан скорее на рассеянии излучения, чем на его прохождении. Этот прибор выпускается серийно и применяется для измерения толщины труб и пластин в тех случаях, когда доступна только одна из сторон объекта⁸. Для каждого данного материала можно отградуировать прибор прямо в единицах толщины. Этот прибор позволяет измерять с точностью до 5% толщины стенок труб вплоть до 1,25 см (рис. 6). Можно с его помощью также измерять толщину и по проходящим лучам, но для тонких слоёв чувствительность будет

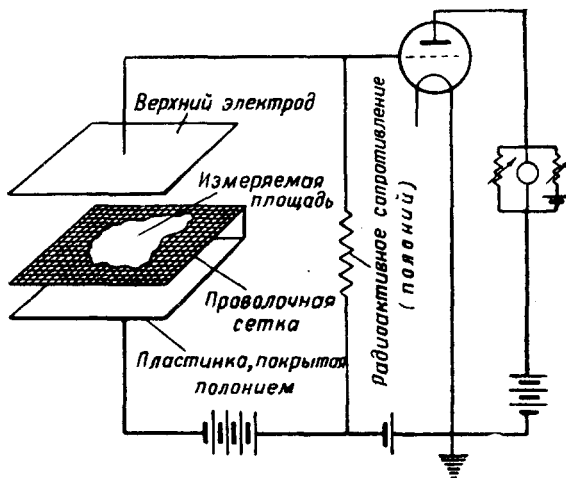


Рис. 8. Схема прибора для измерения площади.

меньше, чем при измерении по рассеянию. Широкое применение этот прибор нашёл в нефтяной промышленности.

С помощью измерения рассеянного излучения можно определять концентрацию растворов, движущихся по трубам или хранящихся в закрытых баллонах. Кроме того, можно определять положение поверхностей раздела двух жидкостей или жидкости и газа. Поскольку прибор действует электрически, его можно приспособить для контроля технологического процесса путём приведения в действие соответствующих клапанов, регулирующих скорость течения или концентрацию раствора.

Другой измеритель уровня жидкости основан на обратной квадратичной зависимости интенсивности радиации небольшого источника от расстояния последнего до детектора (рис. 7). Помещая источник на поплавке и детектор поверх резервуара, нетрудно измерить высоту жидкости в резервуаре²². Любой источник γ -лучей с большим периодом распада применим для этих целей.

Можно измерять площадь небольших пластин произвольной формы, помещая их над источником, равномерно распределённым по плоскости, и измеряя соответствующее уменьшение ионизации² (рис. 8). В этом случае в качестве источника радиации обычно

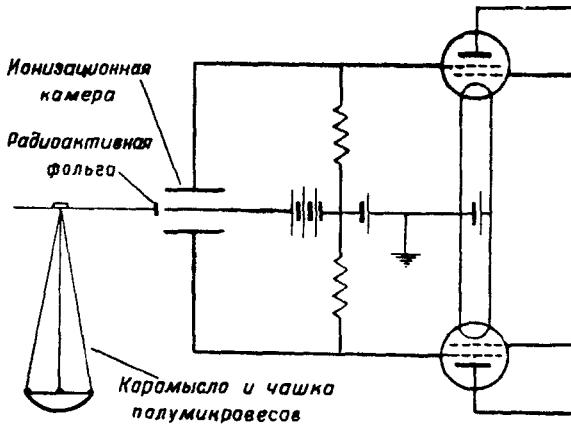


Рис. 9. Схема радиоактивных полумикровесов⁹.

пользуются полонием, так как его α -лучи полностью поглощаются очень тонкими толщинами (порядка 0,025 мм).

Недавно был предложен остроумный способ повышения чувствительности полумикровесов, позволяющий взвешивать навески порядка микрограмма. Источник α -лучей располагается на конце коромысла так, чтобы лучи попадали в двойную ионизационную камеру. Смещение из среднего положения обнаруживается по показаниям ионизационной камеры⁹ (рис. 9).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. «Четвёртый полугодовой отчёт» комиссии по атомной энергии, 1948 г.
2. M. Blau and J. R. Carlin, *Electronics* **21**, 78 (1948).
3. K. Buchdahl and M. F. Polglase, *Ind. Eng. Chem., Anal. Ed.* **18**, 115 (1946).
4. J. T. Jr. Burwell, *Nucleonics* **1**, 38 (1947).
5. *Chem. Eng. News*, **26**, 2006 (1948).
6. G. L. Clark, S. G. Gallo and B. H. Lincoln, *J. App. Phys.* **14**, 428 (1946).
7. S. Eaton, R. Hyde and B. S. Old, *Am. Inst. Mining Met. Engrs.; Tech. Pub.* 2453 (1948).
8. Engineering Laboratories Inc., Tulsa Okla., «Penetron».
9. I. Feuer, *Anal. Chem.* **20**, 1231 (1948).
10. A. R. Gardner, *Modern Industry*, Feb. 15 (1948).
11. C. Goodman, J. Irvine and C. Horan, *J. Ind. Hyg. Toxicol.* **25**, 275 (1943).

12. J. Gregory, *Nature* **157**, 443 (1946).
 13. P. Hahn, E. Jones, P. Lowe, G. Meneely and W. Peacock, *Am. J. Physiol.* **143**, 191 (1945).
 14. J. Holloman and J. Wulff, *Am. Inst. Mining Met. Engr., Tech. Pub.* 1458 (1942).
 15. E. Kopecki, *Iron Age* **160**, 60 (1947).
 16. Little, D. Arthur, Inc.; *Ind. Bull.* **242**, (1948).
 17. W. Mahan, *General Foods Tech. Bull.* **2**, 1 (1948).
 18. A. Morrison, *Nondestructive Testing*, стр. 24 (1947).
 19. R. Rawson, R. Evans, J. Means, W. Peacock, J. Lehrman and R. Cortell, *J. Clin. Endocrinol.* **4**, 1 (1944).
 20. B. Sakmann, J. Burwell and J. Irvine, *J. Appl. Phys.* **15**, 459 (1944).
 21. B. Sakmann, N. Grossman and J. Irvine, *Natl. Advisory Comm. Aeronaut., Tech. Notes* 1355 (1947).
 22. A. Schreiber, *Nucleonics*, **2**, 33 (1948).
 23. J. Stanley, *Ibid.*, **1**, 70 (1947).
 24. T. Winkler and J. Chipman, *Am. Inst. Mining Met. Engrs., Tech. Pub.* 1987 (1946).
-