

Развитие радиометрических методов измерений в горном деле и геологии Польской Народной Республики

Л. ГУРСКИЙ, А. ЛЕНДА, К. ПШЕВЛОЦКИЙ

УДК 543.52:550.835

(Институт ядерной техники Горно-металлургической академии, Краков, ПНР)

Польша — страна, экономика которой в значительной степени базируется на добыче и переработке минерального сырья. Это обстоятельство способствовало развитию в Польше горного дела и связанных с ним областей науки и техники, в частности ядерной техники.

Непосредственно после второй мировой войны в Польше были начаты работы в области приборостроения и создания методов радиометрического каротажа буровых скважин. Они позволили внедрить эту технику в промышленность уже в 1949 г. [1].

В 1950—1956 гг. был разработан и опробован в промышленных условиях радиометрический метод поисков калиевых солей [2]. Новизна метода заключалась в комплексном способе интерпретации результатов нескольких типов радиометрического каротажа, выполненного в одной буровой скважине [3].

В последующие годы, когда радиоактивные изотопы стали в Польше более доступными, основное внимание уделялось разработке методов измерений, позволяющих решать различные задачи при подземной добыче сырья и исследованиях буровых скважин, при гидрогеологических исследованиях и гидростроительстве. Разрабатывалась также методика радиометрических анализов образцов горных пород [4—6].

В 1960 г. при Горно-металлургической академии в Кракове был создан Институт ядерной техники для подготовки инженеров в области ядерной техники и проведения научных исследований с использованием этой техники в металлургии, горном деле и геологии. Одновременно были организованы радиоизотопные лаборатории в научно-исследовательских институтах, подчиненных ведомствам, руководящим развитием отечественного горного дела.

В эти же годы в больших масштабах стало развиваться научное сотрудничество в области ядерной техники между Польшей и СССР, США, Францией, Австрией, Великобританией и Международным агентством по мирному использованию атомной энергии в Вене. Особенно тесные научные связи были налажены с Всесоюзным научно-исследовательским институтом ядерной геофизики и геохимии (ВНИИЯГГ) в Москве.

В 1962 г. в Кракове и в 1965 г. в Варшаве были проведены международные конференции, посвященные ядерной геофизике.

В настоящей статье дается обзор некоторых направлений применения ядерной техники для целей горного дела, ядерной геологии и геофизики, развивающихся в Польше в последние годы.

Применение ядерной техники в горном деле

В настоящее время в польском горном деле применяются в относительно широких масштабах радиоизотопные реле и датчики для целей сигнализации, блокировки и автоматизации. Начато внедрение в промышленность установок для измерения параметров технологических процессов в горнодобывающей промышленности: плотномеров закладочной смеси, измерителей зольности, радиофлуоресцентных приборов для быстрого определения содержания железа, меди, цинка и свинца в рудах, радиоизотопных весов, устанавливаемых на конвейерах, а также толциномеров для труб. Опытные серии этих приборов изготавливаются Бюро оборудования ядерной техники, подчиненным Уполномоченному правительства по использованию ядерной энергии.

На основе ядернофизических методов развиваются исследования некоторых физических явлений в горном деле. Это особенно относится к проблемам, связанным с применением гидрозакладки.

Измерение плотности гидросмесей. Технология гидрозакладки предполагает полную закладку пространства горных выработок сыпучим материалом, чаще всего песком, который добывают с помощью гидромониторов и подают под действием давления, создаваемого в стволе столбом гидросмеси. Благодаря постоянной высоте нагнетания и унификации трубопроводов единственным параметром, регулируемым в ходе закладки, является плотность.

Систематические измерения плотности гидрозакладочной смеси, проведенные при помощи радиоизотопных плотномеров [7], позволили выявить несовершенство применявшейся ранее

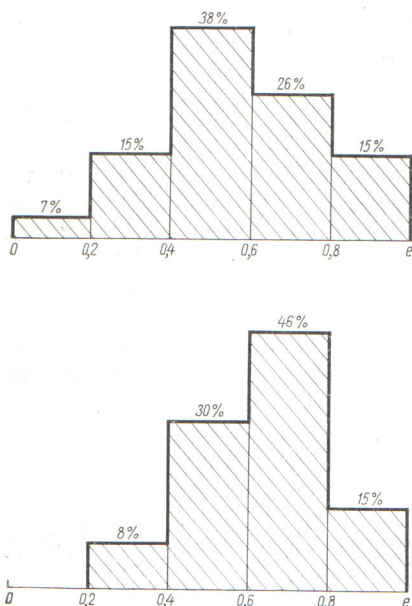


Рис. 1. Гистограмма плотности закладочной смеси:

верхний график — участок, удаленный от ствола; нижний график — участок, находящийся вблизи ствола; $e = f(\rho)$ — консистенция закладочной смеси.

технологии приготовления закладочной смеси. На рис. 1 представлены гистограммы плотности закладочной смеси, транспортируемой по одному и тому же стволу на два различных эксплуатационных участка каменноугольной шахты «Сосновец» [8]. Из них видно, что средняя плотность закладочной смеси поддерживается главным образом при подаче на участок, наиболее отдаленный от ствола. Вблизи ствола наблюдается отклонение от средней плотности. Неполное использование транспортной способности трубопровода во втором случае обусловлено низкой производительностью применяемого метода разработки песка.

В Главном институте горного дела в Катовицах в настоящее время проводятся работы по изучению распределения плотности пульпы в перерабатывающих машинах, целью которых является разработка критериев дальнейшего их совершенствования.

Измерение распределения концентрации твердой фазы гидросмесей. Распределение концентрации твердой фазы — важный параметр, отражающий результирующую всех сил, действующих на твердую фазу. Знание этого распределения в определенных случаях позволяет

найти оптимальные с энергетической точки зрения условия течения в установках для гидротранспорта, особенно там, где течение является принудительным.

Согласно работе [9] при транспортировке гидросмесей при помощи трубопроводов величина гидравлического уклона J может быть выражена формулой

$$J = J_0 + c_m \frac{\gamma_M - \gamma_c}{\gamma_M} \cdot \frac{W}{v} \cos \alpha + mfc_v \left[\cos \alpha + \frac{4\bar{p}_B}{D\gamma_a} \right] \quad (1)$$

где J_0 — гидравлический уклон для чистой воды; γ_M и γ_c — удельный вес транспортируемого материала и транспортирующей жидкости соответственно; W — скорость стесненного падения материала в жидкости; v — скорость течения; α — угол наклона трубопровода; c_m — весовая концентрация твердой фазы в гидросмеси; c_v — объемная концентрация транспортируемого материала; m — коэффициент распределения концентрации; f — коэффициент трения между твердой фазой и ложем; \bar{p}_B — боковое давление, вызванное турбулентностью струи; D — диаметр трубопровода; γ_a — средний удельный вес гидросмеси.

Второй член выражения (1) представляет собой работу, затрачиваемую на взвешивание твердого материала в жидкости, третий — работу трения о днище трубы, четвертый — работу, затрачиваемую на трение о боковые стенки трубы.

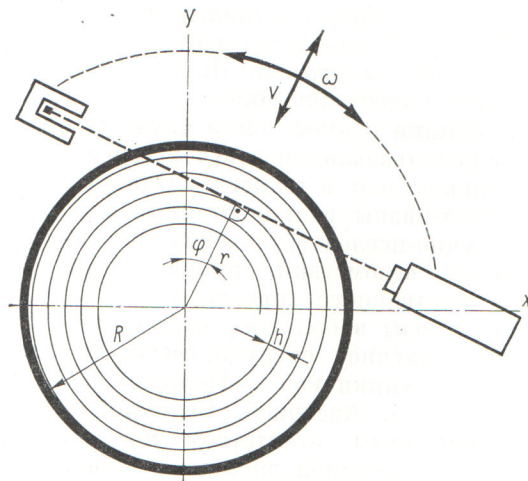


Рис. 2. Схема системы просвечивания трубопровода коллимированным пучком γ -излучения:

R — радиус трубы; h — шаг спирали; φ, r — полярные координаты точки касания; v — радиальная скорость; ω — угловая скорость вращения.

Для использования формулы (1) необходимо экспериментально определить коэффициент m в зависимости от скорости течения, плотности и характера зернистости твердой фазы, транспортируемой по трубопроводу. Распределение концентрации твердой фазы в трубопроводе может быть измерено радиометрическим методом. В одном из вариантов предложено просвечивать трубопровод под различными углами узким пучком γ -излучения диаметром 5 мм, перемещающимся касательно к спирали [10] (рис. 2). Таким образом получают информацию относительно плотности среды вдоль ряда хорд, равномерно распределенных по изучаемому сечению, и находят распределение концентрации твердой фазы:

$$\rho(x, y) = \sum_{n=0}^N \sum_{i=0}^n a_{ni} x^{n-i} y^i, \quad (2)$$

где $\rho(x, y)$ — плотность примеси в точке с координатами x, y . Если в многочлен (2) ввести уравнения избранной системы хорд

$$y_i = \alpha + \beta x, \quad (3)$$

а также предположить, что величина средней плотности, измеренной для каждой хорды, может быть представлена в виде

$$\bar{\rho} = \frac{x_2 \int_{x_1}^{x_2} \rho(x) dx}{x_2 - x_1}, \quad (4)$$

где x_1 — абсциссы точек пересечения отдельных хорд с окружностью, то неизвестными оказываются лишь коэффициенты многочлена (2), так как значения средней плотности $\bar{\rho}$ определяют экспериментально. Если число уравнений (4) больше числа коэффициентов a_n в многочлене (2), то становится возможным численное определение этих коэффициентов и описание искомого распределения плотности или концентраций твердой фазы в гидросмеси при помощи многочлена (2).

Измерения на действующих закладочных установках [10] показали, что при установившихся условиях течения гидросмеси распределение концентрации песка по поперечному сечению трубопровода является неоднородным; при определенных плотностях гидросмеси наблюдалось увеличение концентрации твердой фазы на оси трубопровода.

С помощью описанного метода возможно также экспериментальное определение коэффициента m в уравнении (1).

Измерение скоростей течения гидросмесей. Для измерения скорости течения гидросмесей

на промышленных установках предложен метод измерения времени перехода пиков [11], который позволяет получить точность измерения порядка 0,5% и осуществить маркировку гранулометрических фракций смеси. Усовершенствованным спектрометрическим методом можно одновременно измерять скорости течения нескольких различных фракций. Такие измерения были выполнены в 1968 г. на установке для приготовления закладочной смеси в каменноугольной шахте «Сосновец» [12]. Зерна твердой фазы имитировали при помощи искусственно приготовленных силикатов (стекла) с преднамеренно введенными элементами, которые после их активации в реакторе играли роль меток. В случае жидкой фазы был использован водный раствор K_2CO_3 (см. таблицу). Измери-

Метки отдельных гранулометрических фракций

Фракция	Изотоп	$E, \text{кэв}$
$m \times 10^3:$ 0,3—0,5	Sb ¹²⁴	180
2—3	Mo ⁹⁹	840
10—12	Rb ⁸⁶	1080
Вода	K ⁴²	1530

тельная база составляла $\sim 800 \text{ м}$. Четырехканальный амплитудный анализатор позволял независимо регистрировать движение воды и меченых гранулометрических фракций твердой фазы.

Из результатов радиометрических измерений, представленных на рис. 3, следует, что по мере

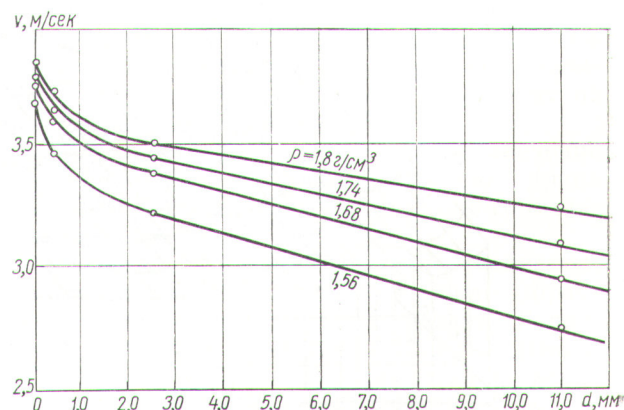


Рис. 3. Скорости v движения отдельных фракций твердой фазы с диаметром частиц d при постоянной плотности смеси ρ .

увеличения диаметра частиц d (особенно для гидросмесей с низкой плотностью) изменения скорости течения уменьшаются. Скорость движения зерен с $d \approx 10$ мм достигает 30% скорости жидкой фазы.

Измерения такого типа имеют важное практическое значение, так как путем выбора оптимальных условий гидравлической транспортировки многофракционного материала можно свести к минимуму затраты на измельчение породы для гидрозакладки.

Измерение физических параметров осажденной закладочной смеси. Процессы, протекающие в осажденной закладочной смеси, до сих пор сравнительно мало изучены. Эта смесь в первую очередь подвергается уплотнению под действием собственного веса, протекания через нее воды и давления кровли. Для горного дела важна количественная характеристика изменений в зависимости от времени.

В инженерной геологии для измерения объемного веса и влажности сыпучих грунтов в течение нескольких лет применяются радиометрические методы. Один из них основан на определении интенсивности γ -излучения в сыпучей среде, второй — на замедляющей способности изучаемой среды по отношению к нейтронам. Точность измерения объемного веса с помощью серийной аппаратуры составляет $0,03$ г/см³, влажности — 1% H₂O. Исследования, проведенные в 1967—1968 гг., показали, что изменения плотности и влажности в условиях шахты можно контролировать радиометрическими методами. Измерения были проведены в буровой скважине глубиной 40 м, пройденной

в осажденной закладочной смеси. В ходе исследований, продолжавшихся около шести месяцев, не наблюдалось восприятие давления кровли. Была отмечена лишь некоторая неоднородность плотности, обусловленная технологией закладки. На рис. 4, иллюстрирующем изменение влажности изучаемой среды, можно наблюдать процесс ее уменьшения с ~ 15 до 5%.

Накопленный опыт показывает, что радиометрические методы создают новые возможности экспериментального изучения непрерывной среды, что представляет особый интерес для горного дела и геологии.

Применение ядерной техники при исследованиях в буровых скважинах и гидрогеологии

Целью описываемых ниже работ, выполненных в краковском Институте ядерной техники Горно-металлургической академии и в Отделении V Института ядерных исследований, является разработка новых или усовершенствование применяемых методов γ -каротажа, измерений плотности γ — γ -методом и использования радиоактивных изотопов для изучения движения подземных вод.

γ -Каротаж буровых скважин. Метод γ -каротажа скважин позволяет изучать литологию пересекаемых геологических образований и определять концентрации радиоактивных элементов в породах. Регистрируемая при этом интенсивность γ -излучения зависит не только от концентрации радиоактивного элемента, но также от типа детектора, геометрии измерений, поглощающих свойств материала, заполняю-

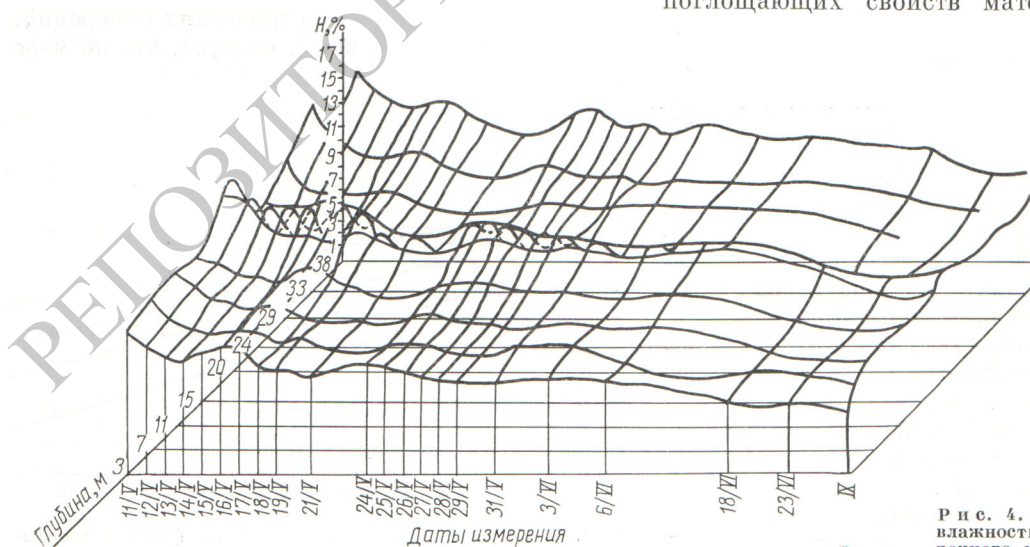


Рис. 4. Зависимость изменения влажности H осажденного закладочного материала от времени.

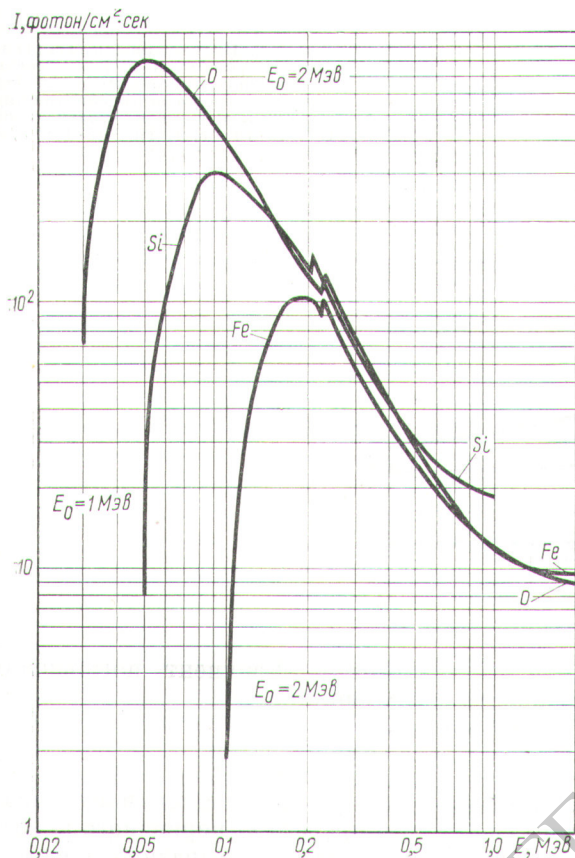


Рис. 5. Спектры рассеянных γ -квантов в однородных бесконечных средах для различных значений $Z_{эфф}$ и энергии E_0 .

щего скважину, а также от химического состава породы.

Вопросы стандартизации методики таких измерений и градуировки соответствующих детекторов рассмотрены в работе [13]. Однако предложенная единица измерений и способ градуировки датчиков не свободны от определенных недостатков. Поэтому в Институте ядерной техники были предприняты исследования [см. работы 14, 15], позволяющие однозначно связать интенсивность I с искомой концентрацией радиоактивных элементов q . Теоретические расчеты интенсивности регистрируемого γ -излучения в радиоактивных породах с равномерно распределенными источниками и переменным эффективным атомным номером $Z_{эфф}$ (рис. 5) сравнивались с результатами измерений на моделях. Теоретические кривые были исправлены на эффект поглощения в обсадных трубах. Показано, что для исключения влияния

химического состава среды на результаты измерения естественной радиоактивности необходимо применять дискриминацию регистрируемого излучения на уровне энергий от 200 кэВ (осадочные породы) до 400 кэВ (руды) (рис. 6). В настоящее время изучается эффект влияния типа детектора на результаты γ -каротажа, а также разрабатываются и конструируются градуировочные модели для датчиков.

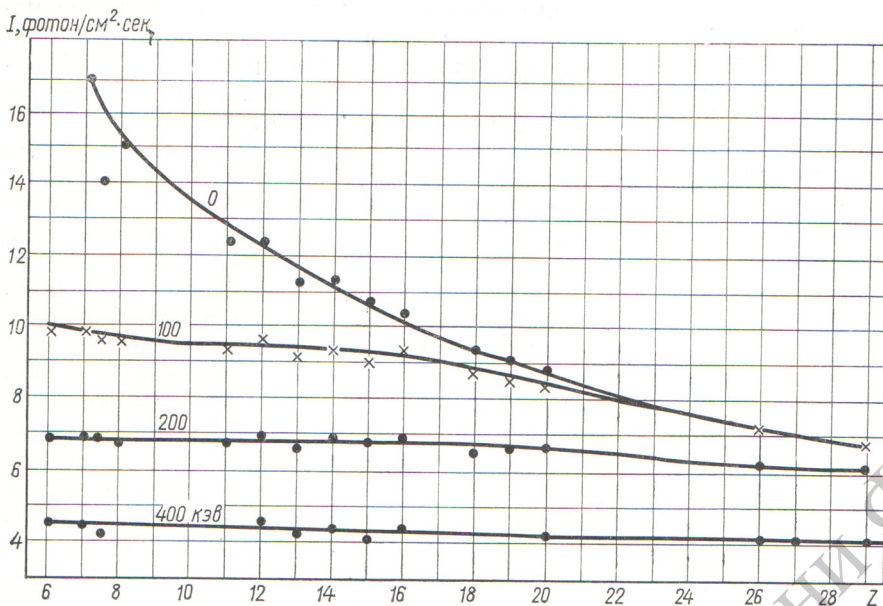
Теория γ -каротажа вместе с практическими указаниями разработана Чубеком [16]. Зависимости кажущихся мощности и интенсивности от действительных мощности и интенсивности γ -излучения, радиуса скважины, длины и диаметра детектора, плотности породы и раствора, скорости перемещения датчика в скважине и постоянной времени интегрирующей ячейки представлены в его работе в виде номограмм. Возможность перехода от качественной к количественной интерпретации имеет большое значение при поисках урана, корреляции мощности пластов, пересекаемых скважинами, и т. п.

При определении содержания урана в породе возникают дополнительные затруднения, обусловленные тем, что регистрируется γ -излучение Bi^{214} (RaC), являющегося продуктом распада урана. Обычно коэффициент радиоактивного равновесия неизвестен, а его измерения связаны с большими трудностями. Для однозначного определения содержания урана в руде предложена новая разновидность метода γ -каротажа [17], так называемый избирательный γ -каротажа, основанный на использовании фотоэффекта при поглощении γ -излучения U, присутствующего в породе. Благодаря anomalно большому поглощению γ -квантов малых энергий присутствие урана изменяет форму спектра γ -квантов, излучаемых урановыми точечными источниками, распределенными в породе. Отношение интенсивности рассеянных γ -квантов, регистрируемых в двух энергетических областях спектра, $I_1/I_2 = K$ зависит от величины $Z_{эфф}$ среды.

Для определенной залежи урана значение $Z_{эфф}$ пропорционально содержанию урана и практически не зависит от химического состава вмещающей породы.

Этот метод, разрабатываемый совместно Институтом ядерной энергии в Сакле (Франция) и Институтом ядерной физики Горно-металлургической академии в Кракове (Польша), прошел лабораторную проверку и испытания в условиях залежи [18, 19].

Испытания показали, что он пригоден для определения содержания урана в залежах



Р и с. 6. Интенсивность регистрируемых γ -квантов в зависимости от атомного номера среды Z для различных порогов дискриминации (0—400 кэВ) и смеси γ -излучателей U^{238} ($5 \cdot 10^{-6}$ г/г), Th^{232} ($5 \cdot 10^{-6}$ г/г) и K^{40} ($5 \cdot 10^{-3}$ г/г).

в пределах 0,05—0,1% со стандартным отклонением порядка 10—20% при условии использования электронной аппаратуры, обладающей высокой стабильностью.

Метод гамма — гамма-каротажа буровых скважин в применении к измерению плотности пород. Градуировку аппаратуры для определения плотности пород обычно проводят в лабораторных условиях на моделях, имитирующих бесконечную среду. Вопрос определения минимальных размеров моделей, которые могут быть использованы для градуировки данного измерительного устройства, подробно рассмотрен в работе [20]. На основании расчетов методом Монте-Карло спектров рассеянных γ -квантов для случая плоской геометрии изучены минимальные размеры моделей для градуировки γ — γ -датчиков в зависимости от плотности модели, энергии γ -квантов и расстояния детектора от источника. Лабораторные исследования показали хорошую сходимость с теоретическими результатами. Итоги этих же расчетов при плоской геометрии были использованы для построения так называемой универсальной калибровочной кривой для измерения плотности γ — γ -методом [21].

Сущность этого метода заключается в следующем. Из принципа подобия вытекает, что при постоянном химическом составе среды (постоянном $Z_{эфф}$) произведение l^2N (l , N — длина и показания детектора соответственно) является функцией произведения $l\rho$ или μl ,

где μ — линейный коэффициент поглощения первичного излучения.

Таким образом:

$$l^2N = Qf(\mu l). \quad (5)$$

В этой формуле μl выражается в единицах длины свободного пробега λ_0 первичного кванта в породе. Если, однако, l выразить в единицах λ_p

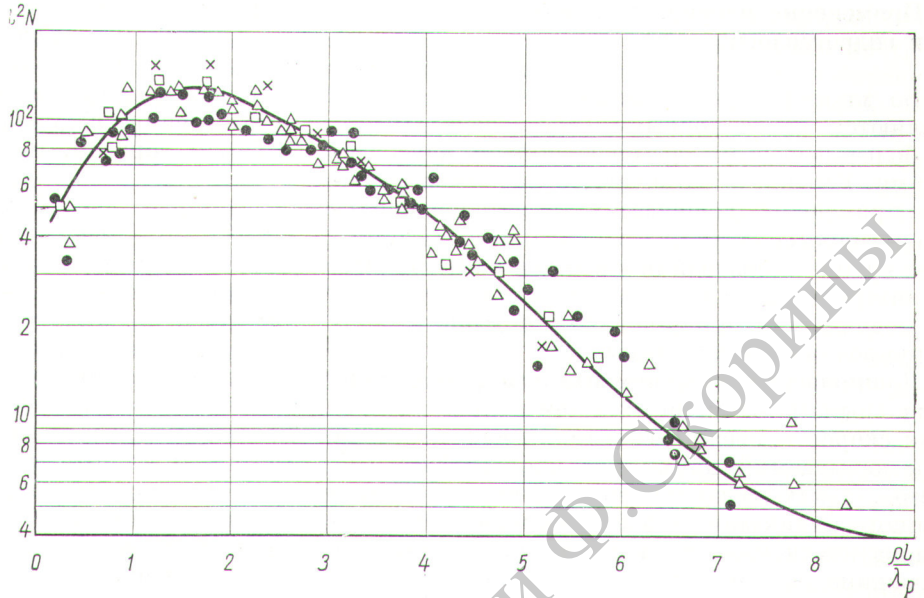
$$\lambda_p(E_0) = k(E_0)\lambda_0(E_0), \quad (6)$$

то можно подобрать коэффициенты $k(E_0)$ таким образом, чтобы расстояния ρl , выраженные в единицах $\lambda_p(E_0)$ для различных исходных энергий, давали одну и ту же форму калибровочных кривых. Способ расчета коэффициентов $k(E_0)$ и λ_0 представлен в работе [22].

Для проверки правильности этого метода собран обширный экспериментальный материал по измерениям плотности γ — γ -методом, проведенным различными авторами в геометрии плоскости или близкой к ней. После пересчета экспериментальных точек согласно принципу подобия получена очень хорошая сходимость измерений, выполненных датчиками различной конструкции (рис. 7).

Химический состав вмещающих пород влияет на результаты измерений плотности γ — γ -методом, изменяя вероятности комптоновского и фотоэффектов. Если известны состав породы и ее влажность, доля комптоновского эффекта может быть легко учтена. Расчет фотоэлектрического поглощения значительно труднее, так

Рис. 7. Универсальная калибровочная кривая для плотностных γ - γ -датчиков с источниками Hg^{203} (\square), Cs^{137} (\triangle), Co^{60} (\bullet) и Se^{75} (\times).



как спектр рассеянных квантов (и тем самым показания датчика) сильно зависит от $Z_{\text{эфф}}$.

Одним из методов исключения влияния фотоэлектрического поглощения является отрезание мягкой составляющей рассеянного излучения путем применения соответствующих фильтров из материалов с высоким Z .

Работы по подбору оптимального фильтра [23] показали, что он должен состоять из следующих фольг (считая в направлении к детектору): 430 мг/см^2 свинца, 350 мг/см^2 меди и 760 мг/см^2 кадмия.

При использовании такого фильтра неточность определения плотности, обусловленная изменением $Z_{\text{эфф}}$ породы, примерно в три раза меньше по сравнению с измерением без фильтра.

Другой метод, исключающий влияние химического состава, заключается в применении двух счетчиков, расположенных на различных расстояниях от источника. Показания такого датчика практически не зависят от изменения $Z_{\text{эфф}}$ породы и влияния так называемой ближней зоны, т. е. области среды, непосредственно прилегающей к датчику. Образец такого датчика с двумя детекторами был сконструирован в Институте ядерной техники Горно-металлургической академии в 1968 г. Первые измерения показали, что введение железного поглотителя толщиной 5 мм между средой и датчиком (имитирующего обсадку скважины трубами) вызывает изменение показаний датчика, соответствующее изменению плотности всего на $1,5\%$.

Одна из интересных возможностей применения γ - γ -каротажа состоит в том, что он может служить для определения зольности бурых углей в пласте [24]. При использовании γ - γ -датчика с относительно большой длиной зонда (расстояние источник — детектор равно 60 см) и источника Se^{75} активностью 10 — 25 мкюри точность определения зольности бурых углей составляет $\pm 5\%$.

Интересно отметить, что, определяя зольность залежи методом γ - γ -каротажа в условиях скважины, делают меньшую ошибку, чем в случае химического анализа керна в лаборатории.

Импульсный нейтронный каротаж

В 1968 г. в Институте ядерной техники Горно-металлургической академии был смонтирован и прошел испытания в полевых условиях прототип скважинного генератора нейтронов [25], построенный в сотрудничестве с ВНИИЯГГом. Этот генератор дает выход нейтронов $2 \cdot 10^7 \text{ нейтр/сек}$. Конструктивной особенностью генератора является применение сцинтилляционного счетчика с кристаллом CsI(Tl) вместо пропорционального счетчика, а также использование монитора нейтронов. Полевые испытания подтвердили стабильную работу установки при температуре до $+70^\circ \text{ C}$.

Предусматривается сооружение новой модели генератора и опытная эксплуатация существующего прототипа.

Применение ядерной техники в гидрогеологии

Во многих случаях радиоизотопные методы являются более точными, представительными и более дешевыми по сравнению с классическими. Именно эти причины обусловили широкое применение радиоизотопных методов в польской гидрогеологии [5]. Проводимые в настоящее время исследования касаются как методики и интерпретации получаемых результатов, так и правильного планирования опытов и конструирования аппаратуры.

Планирование эксперимента в гидрогеологии. Основным методом, используемым для измерения скорости течения грунтовых вод, является так называемый двух- или многоскважинный метод, заключающийся во введении радиоизотопного индикатора в одну скважину и наблюдении изменений его концентрации в другой скважине на оси потока. Основной недостаток этого метода — неполный учет явлений, происходящих при транспортировке индикатора через пористые среды, и обусловленная этим неоднозначность информации относительно количества индикатора и носителя, необходимых для инъекции, при интерпретации результатов измерения.

В связи с этим в Институте ядерной техники была предпринята работа с целью полного описания дисперсионных явлений, происходящих при прохождении воды вместе с индикатором через пористую среду. Получение таких данных позволило бы правильно запланировать эксперимент и осуществить однозначную интерпретацию полученных результатов. На основании статистической модели дисперсии были рассчитаны изменения концентрации индикатора и носителя при прохождении через среду в зависимости от таких параметров, как форма и величина инъекционного объекта, расстояние между инъекционной и наблюдательной скважинами, коэффициент дисперсии водоносного слоя, чувствительность аппаратуры, отклонения линии скважин от оси естественного гидравлического склона.

Радиоизотопная аппаратура для гидрогеологических исследований. Здесь необходимо отметить два вида приборов: установку для измерения донной фильтрации в водоемах [26] и прибор для измерения направления и скорости течения в открытых водоемах.

1. Сущность метода и прибора для измерения донной фильтрации основана на принципе сохранения непрерывности водного потока.

Поток воды, проходящий через соответственно прикрытую часть водоема, пропускается через тонкую трубку измерительной установки, в которой определяют скорость течения по времени прохождения радиоизотопного индикатора.

Таким образом, имеем

$$Sv_f = sv, \quad (7)$$

где S — охваченная измерением поверхность дна водоема; v_f — скорость фильтрации в водоеме или из водоема; s — площадь сечения трубки; v — скорость течения в трубке.

Параметры установки подобраны таким образом, чтобы в трубке существовало ламинарное течение для всего избранного диапазона v_f . Тогда с небольшими ограничениями время прохождения индикатора равно удвоенному времени его появления в измерительной установке.

Первые работы на местности с использованием этого метода показали, что он пригоден для измерения скорости донной фильтрации в случае песчаного или гравийного дна, а сконструированный прибор (конвертор течения) позволяет измерять скорость донной фильтрации в воде на глубине не более 30 м в диапазоне скоростей $5 \cdot 10^{-9}$ — 10^{-5} м/сек. Точность единичного измерения составляет 10—20%. Метод кажется особенно многообещающим для контроля и подробной локализации мест вытекания из водоемов или же водных потоков.

2. При использовании открытых водоемов необходимо иметь данные о распределении течений и движении воды на различной глубине. В Институте ядерной техники Горно-металлургической академии ведутся исследования по созданию прибора, работающего по принципу определения направления и скорости перемещения введенного радиоактивного раствора. Инъекцию радиоактивного раствора проводят после опускания прибора на требуемую глубину и остановки его в этом положении. Введенный индикатор движется по течению воды в направлении одного из десяти детекторов, расположенных на одинаковом расстоянии по окружности от места инъекции. Скорость определяют по времени прохождения индикатора от места инъекции до одного из детекторов. В состав прибора входят также передающая система, выбирающая по сигналу из наземного пульта управления определенный датчик для измерения, усилитель импульсов и магнитное ориентирующее устройство.

Описанный прибор дает возможность измерения направления и скорости течения в открытых водоемах в диапазоне скоростей, который

до сих пор невозможно было измерить—от 10^{-5} до $2 \cdot 10^{-2}$ — $3 \cdot 10^{-2}$ м/сек [27].

Применение радиометрических методов анализа к проблемам горного дела и геологии

В течение восьми лет группа работников Института ядерной техники Горно-металлургической академии в Кракове занимается вопросами применения ядерной физики для изучения химического состава сырья и промышленных продуктов. Наиболее часто используемыми методами являются недисперсионная рентгеновская флюоресценция, возбуждаемая радиоизотопными источниками, поглощение мягкого γ -излучения и активация быстрыми нейтронами (14 Мэв). Эти методы применялись, в частности, для анализа полиметаллических руд на свинец [28, 29], цинк [30], медь [31, 32], бор, цирконий [33, 34], железо [35, 36], а также для определения воды и соли в сырой нефти.

Свинец определяют по поглощению квантов рентгеновского излучения, получаемого от преобразователей $\text{Sr}^{90} - \text{U}$ и $\text{Sr}^{90} - \text{Pb}$. Диапазон измеряемых концентраций составляет 0—3% Pb, причем абсолютная ошибка равна $\sim 0,05\%$ Pb. Чтобы исключить влияние изменяющихся содержания цинка и железа в руде, используют специальную номограмму, приведенную в работе [28].

Цинк, медь, железо, цирконий и барий определяют методом недисперсионной рентгеновской флюоресценции. В зависимости от определяемого элемента в качестве источников первичного излучения (возбуждающего) применяются следующие изотопы: $\text{H}^3 - \text{Zr}$, Pu^{238} , Cd^{109} , Gd^{153} , Am^{241} . Для определения железа в железистом песке разработано несколько методов с использованием мягкого рентгеновского или γ -излучения. Найдено, что наиболее хорошие результаты дает абсорбционный метод при использовании источника Am^{241} . Разработан также метод определения железа в рудах в полевых условиях при помощи рассеянного излучения вышеупомянутого источника. В качестве детектора рентгеновского излучения применялся пропорциональный счетчик с большим входным бериллиевым окном диаметром 52 мм [37], что обеспечивало высокую эффективность регистрации вторичного излучения и тем самым — малое время анализа (1—3 мин).

В зависимости от непостоянства состава руды, т. е. изменения содержания других элементов, для интерпретации результатов изме-

рений могут быть применены калибровочные кривые или специальные номограммы, построенные путем использования двух измерений для двух различных энергий (например, для двух разных каналов амплитудного анализатора или для двух разных фильтров). При содержании металла в руде 0,1—10% абсолютная ошибка определения составляет 0,1—0,3%. Более подробное сопоставление разработанных методов приведено в работе [38].

Бюро оборудования ядерной техники в сотрудничестве с Институтом ядерной техники разработало переносный прибор FAR-1 для анализа руд в естественном залегании методом недисперсионной рентгеновской флюоресценции с применением парных сбалансированных фильтров. Этот прибор, оснащенный источником Pu^{238} , был использован для определения содержания меди на медных рудниках. После замены фильтров и радиоизотопного источника он может найти применение для анализа других руд. Ошибка определения, составляющая $\sim 0,3\%$ Cu, в значительной степени зависит от однородности распределения металла в исследуемой породе.

Как известно, результаты анализов указанными выше методами обычно существенно зависят от гранулометрического и химического состава вмещающих пород. Эта зависимость приобретает особое значение при анализе порошкообразных полиметаллических руд. Поэтому группа работников Института ядерной техники в течение нескольких лет ведет работы по исключению этих эффектов, считая, что эта проблема имеет основное значение при внедрении описываемых методов. К настоящему времени разработано несколько способов исключения этих эффектов: применение двух фильтров и соответствующей номограммы [32], совместное использование рассеянного и флюоресцентных излучений [33, 34, 39, 40], подбор энергии первичного излучения [41], подбор степени измельчения минерала с целью исключения эффекта грануляции [42] и др.

Метод активации нейтронами с энергией 14 Мэв был применен для анализа медных и цинковых руд. В случае меди отличные результаты могут быть получены при использовании короткоживущего изотопа Cu^{62} и измерении его активности методом совпадений. Этот способ найдет применение в промышленности после разработки достаточно надежной конструкции генераторов нейтронов. С помощью одной автоматизированной установки будет воз-

можно проводить анализы нескольких сот образцов в день.

В сотрудничестве с ВНИИЯГГом успешно выполнены анализы польских медных и цинковых руд методом фотоактивации [43].

Производство эффективных, прочных и одновременно безотказных генераторов нейтронов позволяет также применять разработанный метод активации для промышленного непрерывного определения воды и соли в сырой нефти. Нефть пропускают через две камеры: первую — активационную, находящуюся возле мишени генератора нейтронов, и вторую — измерительную, помещенную между двумя сцинтилляционными счетчиками. Содержание воды оценивают по активности N^{16} , образующегося в результате активации кислорода в нефти, содержание соли — по активности F^{20} , образующегося в результате активации натрия. Этот метод позволяет проводить непрерывные измерения начиная с 0,5 г воды и 0,1 г соли в 1 л нефти.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Miesowicz. Prace badawcze Glownego Instytutu Naftowego, Nr. 1, 24 (1950).
2. J. Czubek et al. In «Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry». Vienna, IAEA, 1962.
3. R. Caldwell. Isotopes and Rad. Technol., 6, 257 (1969).
4. L. Jurkiewicz, J. Czubek. Acta Geophys. Polon., 14, Nr. 3 (1966).
5. M. Borowczyk et al. Nukleonika, 9, Nr. 7—8 (1964).
6. J. Mairhofer et al. Rep. BVFA Arsenal, IAEA Res. Contr., No. 177/R2/RB (1966).
7. T. Florowski et al. Nukleonika, 7, Nr. 9 (1962).
8. Sz. Wierzchowski et al. III Krajowe Sympozjum Zastosowan Izotopow w Technice. Szczecin, 1966.
9. K. Korbel. Rep. «P», No. 957/VI/PH, Institute of Nuclear Research, Warszawa, 1968.
10. L. Jurkiewicz et al. In «Radioisotopes Instruments in Industry and Geophysics». Vol. I. Vienna, IAEA, 1966.
11. K. Korbel et al. Przegląd Gorniczy, Nr. 6, 259 (1963).
12. K. Korbel, K. Przewlocki. Isotopenpraxis, 3, Nr. 3 (1967).
13. W. Belknap et al. In «Drilling and Production Practice», 1959, p. 289.
14. J. Czubek, A. Lenda. Nukleonika, 13, Nr. 4—5 (1968).
15. J. Czubek, A. Lenda. Paper SM-112/8 on Symp. IAEA «Nuclear Techniques and Mineral Resources». Buenos Aires, 1968.
16. J. Czubek. Proc. Nucl. Geophys. Conf. Cracow, 1962.
17. J. Czubek. Nukleonika, 13, Nr. 1 (1968).
18. P. Dumesnil. Commissariat a l'Energie Atomique, CEN Saclay, DEG/EI/R-2249, 1967.
19. P. Dumesnil. Commissariat a l'Energie Atomique, CEN Saclay, DEG/EIR-2418, 1968.
20. J. Charbucinski, K. Umiasowski. Nukleonika (в печати).
21. K. Umiasowski. Ibid., 13, Nr. 4—5 (1968).
22. K. Umiasowski. Диссертация. Краков, 1968.
23. J. Charbucinski. Nukleonika, 13, Nr. 4—5 (1968).
24. A. Szymbowski. Ibid., 13, Nr. 4—5 (1968).
25. E. Chrusciel et al. Isotopenpraxis, H. 4 (1969).
26. A. Zuber et al. Opracowanie w ramach kontraktu z IAEA, Vienna, Res. Contr. No. 580/RB. Krakow, 1968.
27. L. Baranski et al. Nukleonika, 13, Nr. 4—5 (1968).
28. B. Dziunikowski. Ibid., 8, 553 (1963).
29. B. Dziunikowski, T. Florowski. The method of rapid determination of lead content in zinc-lead ore samples. Polish Patent No. 49483.
30. B. Dziunikowski. Nukleonika, 9, 829 (1964).
31. L. Gorski et al. Talanta, 11, 1135 (1964).
32. J. Niewodniczanski. In «Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics». Vol. I. Vienna, IAEA, 1966, p. 173.
33. B. Dziunikowski et al. Chemia Anal., 12, 1107 (1967).
34. B. Holyńska, L. Langer. Anal. Chim. Acta, 40, 115 (1968).
35. B. Dziunikowski, Z. Skrzyszewski. Nukleonika, 12, 85 (1967).
36. B. Dziunikowski. Trans. Inst. Min. Metal., 76B, 202 (1967).
37. K. Ostrowski et al. Nukleonika, 13, 302 (1968).
38. K. Ostrowski et al. Ibid., 13, 289 (1968).
39. A. Lubecki et al. Spectrochim. Acta, 23A, 83i (1967).
40. A. Lubecki. J. Radioanal. Chem., 2, 3 (1969).
41. A. Lubecki, M. Wasilewska. Ibid., 1, 211 (1968).
42. A. Lubecki et al. Spectrochim. Acta, 23B, 465, 497 (1968).
43. J. Niewodniczanski et al. Nukleonika, 13, 1153 (1967).