

3. Е. М. Янишевский, В. М. Константинов. «Геология рудных месторождений», № 6, 38 (1960).
4. А. И. Тугаринов. В сб. «Основные черты геохимии урана». М., Изд-во АН СССР, 1963, стр. 110.
5. Р. П. Рафальский, К. Ф. Кудинова. «Атомная энергия», 7, 333 (1959).
6. Л. С. Евсеева, Н. П. Фомина. Окислительно-восстановительные свойства ураноносных пород. М., Атомиздат, 1965.
7. А. Г. Бетехтин. Минералогия. М., Госгеолтехиздат, 1950.
8. А. И. Тугаринов и др. В сб. «Вопросы прикладной радиогеологии». Вып. 2. М., Атомиздат, 1967, стр. 368.

## Разогрев радиационно-химических систем при $\gamma$ -облучении

Ф. А. МАХЛИС

УДК 541.15

Значения поглощенных доз, необходимых для реализации большинства радиационно-химических процессов в промышленном масштабе, а также для проведения исследований, достигают в некоторых случаях сотен мегарад. Поэтому при использовании современных радиационных установок возможно значительное увеличение температуры облучаемых объектов, что требует знания величины температуры и скорости ее изменения при облучении.

В настоящей работе рассмотрено влияние на разогрев объектов поглощенной дозы (до достижения установившейся температуры), мощности поглощенной дозы (от 1 до 4 Мрад/ч), материала объекта, диаметра объекта (20—100 мм), условий облучения (свободная воздушная среда, воздушнонаполненные запаянные ампулы, сосуды Дьюара, печи без обогрева).

В качестве модели были взяты цилиндры из полиметилметакрилата (оргстекло), дюралюминия и стали (длина 200 мм).

Эксперименты проводились на мощной радиационной установке с облучателем в виде двух параллельных плоскостей, набранных из источников  $\gamma$ -излучения  $\text{Co}^{60}$ . Для измерений использовались термопары ХК. Значения доз определялись с помощью ферросульфатного дозиметра.

Рассмотрим влияние указанных выше факторов на радиационный разогрев объектов при  $\gamma$ -облучении.

**Поглощенная доза.** В результате достаточно длительного  $\gamma$ -облучения в объекте устанавливается стационарное температурное распределение, время достижения которого зависит от мощности поглощенной дозы и геометрических параметров объекта, а также от теплофизических свойств объекта и окружающей среды. Расчет этой равновесной температуры для объектов, обладающих простой геометрической формой, не представляет трудностей [1, 2]. Однако при облучении химических и биологи-

ческих систем время набора необходимой поглощенной дозы часто оказывается меньшим, чем это требуется для достижения стационарного температурного режима в объекте. В этом случае основной интерес представляет зависимость температурного поля объекта от поглощенной дозы (времени облучения).

В случае однородного изотропного цилиндрического тела, в котором тепловой поток распространяется радиально, уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} - \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\frac{A(r, \tau)}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $t$  — температура;  $r$  — радиус;  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $\tau$  — время;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $A(r, \tau)$  — тепловыделение за единицу времени в единице объема. При облучении химических систем

$$A(r, \tau) = A_x + q = A_0 e^{-\frac{k}{T}} + q(\bar{P}, \tau), \quad (2)$$

где  $A_x$  — тепло, выделяющееся в результате радиационно-химических реакций, причем в случае реакций первого порядка справедливо уравнение Аррениуса;  $q$  — разогрев объекта благодаря поглощению энергии излучения;  $A_0, k$  — константы;  $T$  — абсолютная температура;  $\bar{P}$  — средняя мощность поглощенной дозы.

Однако в большинстве случаев величиной  $A_x$  можно пренебречь, так как  $q \gg A_x$ . Кроме того, поскольку в радиационной химии используются долгоживущие источники  $\gamma$ -излучения, а равномерность поля поглощенных доз в объектах должна быть достаточно высокой, то  $q(\bar{P}, \tau) = \text{const}$ . Поэтому в дальнейшем мы исходили из условия  $A = q = \text{const}$ .

Если начальная температура цилиндрического объекта равна нулю, а на поверхности ( $r = R$ ) происходит теплообмен со средой нуле-

вой температуры, то уравнение (1) имеет следующее решение [1]:

$$t = \frac{qR^2}{4\lambda} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} + \frac{2\lambda}{\alpha R} \right) - \frac{2q\alpha}{\lambda^2 R} \sum \frac{J_0(\beta_n r)}{\beta_n^2 \left( \frac{\alpha^2}{\lambda^2} + \beta_n^2 \right) J_0(\beta_n R)} e^{-\alpha \beta_n^2 \tau}, \quad (3)$$

где  $\beta_n$  — положительные корни уравнения  $\beta J_1(\beta R) = \alpha/\lambda J_0(\beta R)$ ;  $J_0$  и  $J_1$  — функции Бесселя нулевого и первого порядков.

Уравнение (3) получено для случая цилиндра бесконечной длины, однако эксперимент пока-

зал, что если длина объекта в несколько раз больше его диаметра, то расхождение результатов, рассчитанных по этому уравнению, и экспериментальных данных незначительно.

На рис. 1 и 2 приведена зависимость температуры в центре цилиндрических объектов из различных материалов от поглощенной дозы, полученная с помощью уравнения (3) и экспериментально. Рассмотрены три практически наиболее интересных варианта условий облучения: 1) объект находится в свободной воздушной среде; 2) объект помещен в закрытую стеклянную ампулу, наполненную воздухом при нормальном давлении; 3) объект помещен в стеклянный сосуд Дьюара. Приведенные на рис. 1 и 2 данные соответствуют в основном двум мощностям поглощенных доз ( $\sim 1$  и  $2$  Мрад/ч). Величины коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$ , необходимые для решения уравнения (3), определялись экспериментально.

Рассмотрим результаты, соответствующие облучению в свободной воздушной среде (см. рис. 1, а). Прежде всего видно хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных, что связано с использованием при расчете экспериментальных величин  $\alpha$ . Из рисунков следует, что уравнение (3), полученное для бесконечного цилиндрического стержня, может использоваться и в случае цилиндров конечной длины, если отношение длины к радиусу достаточно велико. Сравнение экспериментальных и расчетных данных, проведенное для цилиндров, диаметр которых составлял

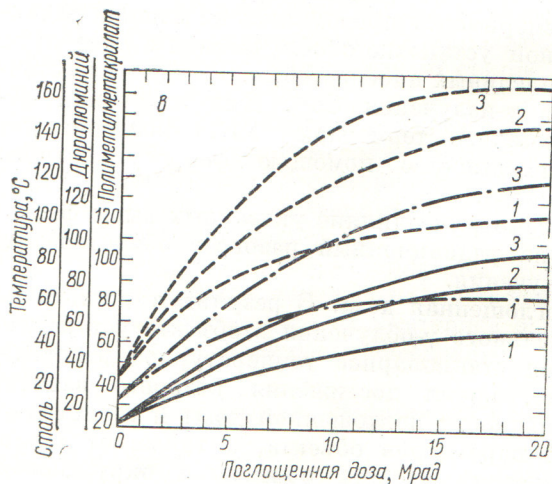
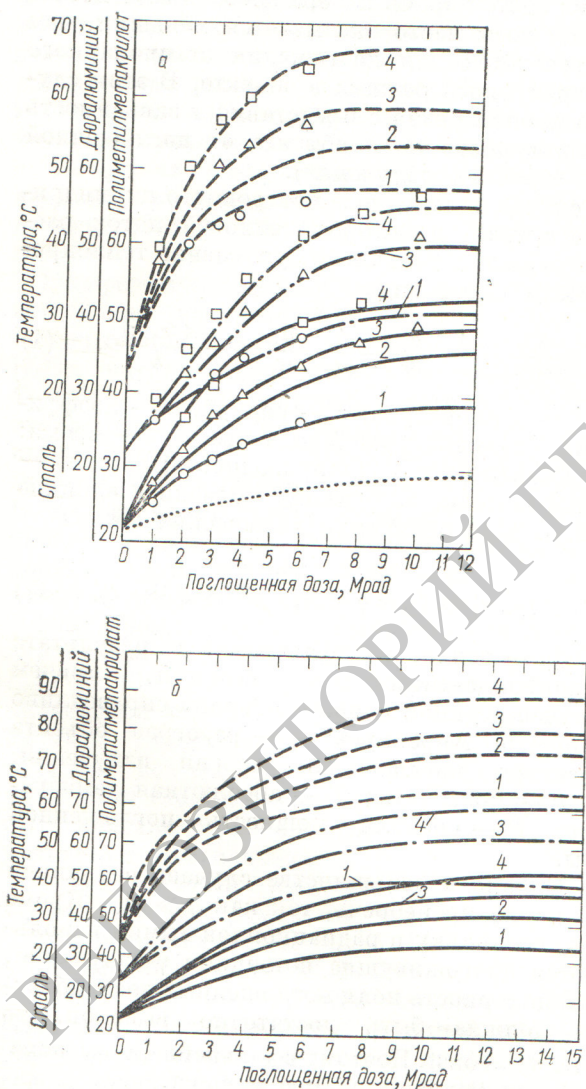
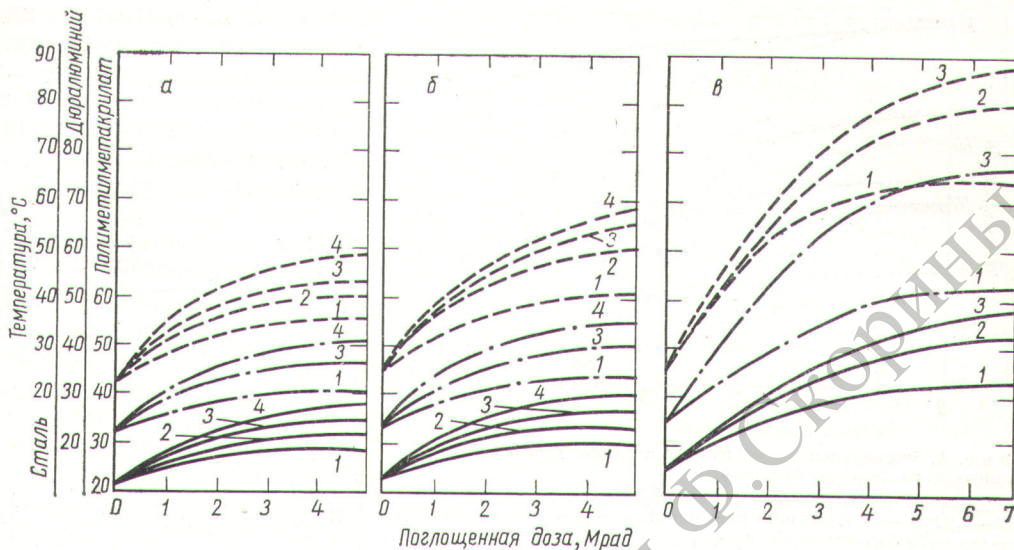


Рис. 1. Зависимость температуры в центре цилиндрических объектов из различных материалов от поглощенной дозы: а — свободная воздушная среда; б — ампула; в — сосуд Дьюара; диаметр цилиндра (мм): 1 — 20, 2 — 30, 3 — 40, 4 — 60; эксперимент:  $\circ, \Delta, \square$  — полиметилметакрилат,  $\text{---}$  — диуралюминий,  $\text{---}$  — сталь,  $\text{---}$  — воздух в облучателе; расчет:  $\circ, \Delta, \square$ . Мощность поглощенной дозы (Мрад/ч): полиметилметакрилат — 2,2; диуралюминий — 1,85; сталь — 1,85 (кривые 1 и 2), 1,6 (кривая 3), 1,3 (кривая 4).

Рис. 2. Зависимость температуры в центре цилиндрических объектов из различных материалов от поглощенной дозы:

а — свободная воздушная среда; б — ампула; в — сосуд Дьюара; диаметр цилиндра (мм): 1 — 20, 2 — 30, 3 — 40, 4 — 60; эксперимент: — — — полиметилметакрилат, — — — диоралюминий, — — — сталь; мощность поглощенной дозы (Мрад/ч): полиметилметакрилат — 1, 2; диоралюминий — 1, 0; сталь — 0, 9.



100 мм и более, показало значительное расхождение результатов.

**Мощность поглощенной дозы.** Как следует из рис. 3, мощность поглощенной дозы при прочих равных условиях оказывает значительное влияние на температуру объекта. При этом максимальная скорость увеличения температуры с возрастанием мощности дозы имеет место в случае достижения объектом установившегося теплового режима. Чем меньше диаметр объекта, тем менее выражено влияние мощности дозы на возрастание температуры при  $\gamma$ -облучении. Так, при возрастании мощности дозы от 1 до 4  $\text{Мрад/ч}$  температура в цилиндре из полиметилметакрилата диаметром 20 мм увеличивается от 30 до 51°C, а в цилиндре диаметром 60 мм — от 35 до 81°C. В случае образцов из стали температура возрастает быстрее, чем в объектах из полиметилметакрилата.

**Материал объекта и контейнера.** Теплофизические характеристики материала объекта оказывают значительное влияние на его разогрев в поле  $\gamma$ -излучения. При этом если влияние теплоемкости на температуру сказывается лишь до наступления стационарного теплового режима, то теплопроводность материала определяет не только величину установившейся температуры, но и скорость ее достижения, а также характер температурного распределения в объекте. Кроме того, объемное тепловыделение значительно зависит от плотности облучаемого вещества.

Влияние материала объекта на величину температуры можно видеть на рис. 1 и 2.

Во многих случаях, особенно при малых поглощенных дозах, когда стационарный тепловой режим еще не достигнут, большое влияние на температуру объекта могут оказывать кон-

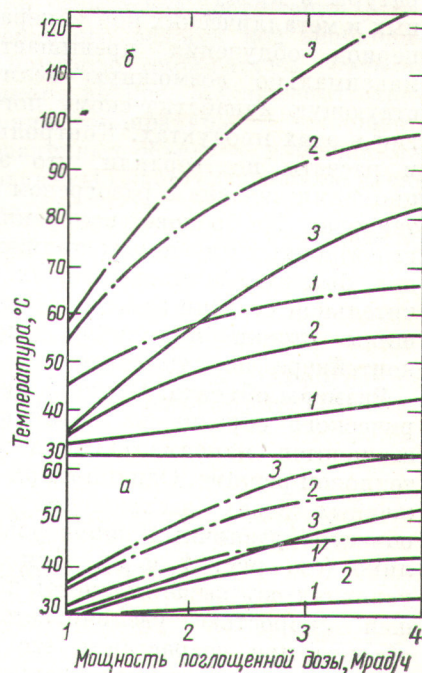


Рис. 3. Зависимость радиационного разогрева объектов от мощности поглощенной дозы:

а — диаметр цилиндра 20 мм; б — диаметр 60 мм; поглощенная доза (Мрад): 1 — 2, 2 — 5, 3 —  $\infty$ ; — — — сталь, — — — полиметилметакрилат.

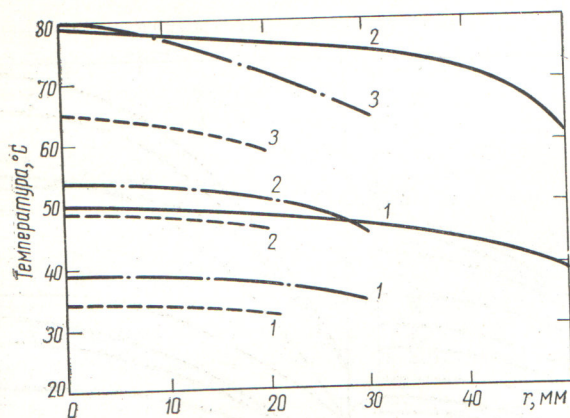


Рис. 4. Радиальное распределение температуры в цилиндрах из полиметилметакрилата.

Мощность поглощенной дозы (Mrad/ч): 1 — 1,14; 2 — 2,22; 3 — 4,0; диаметр цилиндра: — — — — 100 мм, — — — — 60 мм, — — — — 40 мм.

тейнеры, в которых проводится облучение. Это обстоятельство следует учитывать при облучении биологических систем, например при радиационной стерилизации пищевых продуктов. Измерения показали, что увеличение температуры в продуктах, находящихся в стеклянных и металлических контейнерах, в начальный период облучения превышает теоретически максимально возможную величину, соответствующую адиабатическому поглощению энергии в этих продуктах. Контрольные измерения и расчеты подтвердили, что эта кажущаяся аномалия связана с разогревом материала контейнера. На основе измерений и расчетов, выполненных для полых цилиндрических сосудов, был сделан вывод, что их разогрев в значительной степени зависит от материала и толщины стенки контейнера, причем диаметр контейнера не существен.

**Размеры объекта.** Влияние диаметра цилиндрического образца на величину температуры становится максимальным в установившемся тепловом режиме. Однако и при меньших поглощенных дозах расхождение в температурах объектов различных диаметров достаточно велико (см. рис. 1 и 2). При прочих равных условиях чем выше мощность дозы, тем с большей скоростью увеличивается температура объекта при возрастании его диаметра.

Температурное распределение внутри объекта также зависит от мощности дозы, размеров и материала объекта (рис. 4). Чем больше диаметр цилиндра и выше мощность дозы, тем круче спад температуры от центра к поверхности объекта. В отличие от полиметилмета-

крилата, обладающего низкой теплопроводностью, градиент температуры в металлических объектах крайне мал. В случае же тефлона, обладающего еще меньшей теплопроводностью, чем полиметилметакрилат, температура в центре объекта может значительно превышать температуру на его поверхности.

Разность температур в центре и на поверхности облучаемого цилиндрического объекта, °C

Материал	Мощность дозы, Mrad/ч	Диаметр, мм			
		20	40	60	100
Тефлон	1	2	9	19	—
	3	6	25	52	—
Полиметилметакрилат	1	0	1	3	6
	3	2	3	6	16
Дюралюминий	1	0	0	0	—
	3	0	0	0	—
Сталь	1	0	0	0	—
	3	0	0	0	—

Некоторые сравнительные данные по радиационным градиентам температур в различных материалах приведены в таблице. В ней отсутствуют данные для цилиндров большого диаметра из дюралюминия и стали. Дело в том, что величины, приведенные в этой таблице, получены при равномерном поле поглощенных доз в объекте. В случае металлических цилиндров большого диаметра поле поглощенных доз в них при использовании  $\gamma$ -излучения  $Co^{60}$  имеет значительную неравномерность, что искажает распределение температуры в объекте. Кроме того, данные, соответствующие мощности дозы 3 Mrad/ч, несколько занижены, так как объекты были расположены очень близко к плоскости облучателя, что привело к некоторому увеличению температуры поверхности цилиндров в результате переноса тепла от самих источников излучения.

**Условия облучения.** Облучение химических и биологических систем проводится в самых различных условиях и средах. Используют инертные среды, воздух, вакуум, жидкости, причем объекты помещают в запаиваемые ампулы, а также в термо- и криокамеры. В каждом из этих случаев имеют место свои, настолько специфические условия теплообмена, что крайне трудно рассчитать температуру объектов аналитически или численно.

В связи с этим в настоящей работе были выполнены измерения температур в ампулах, сосудах Дьюара и электропечах с выключенным обогревом, аналогичные описанным выше измерениям для объектов, помещенных в свободной воздушной среде. Цилиндрические образцы помещались в ампулы и сосуды Дьюара на распорках, чтобы свести к минимуму передачу тепла теплопроводностью от образца к стенкам сосудов. Воздухообмен между этими емкостями и окружающей средой был ограничен.

Результаты измерений для двух величин мощностей доз приведены на рис. 1, б, в и 2, б, в. Из этих рисунков следует, что общий характер изменения температуры аналогичен рассмотренному выше случаю облучения в свободной воздушной среде. Однако абсолютные значения температур резко возрастают. Так, при мощности дозы  $\sim (1,3 \div 2,0)$  Мрад/ч установившиеся температуры в центре цилиндрических образцов диаметром 40 мм в случае облучения в свободной воздушной среде, ампуле и сосуде Дьюара соответственно составляют: для полиметилметакрилата — 53, 63 и 106° С; для дюралюминия — 55, 70 и 130° С; для стали — 67, 89 и 168° С. При облучении образцов в ампулах и особенно в сосудах Дьюара интенсивность теплоотдачи образцов снижается, что приводит к более значительному влиянию материала объекта на величину температуры, чем это было в случае свободной воздушной среды.

При проведении радиационно-химических исследований часто необходимо поддерживать в объектах относительно невысокие температуры (до 150° С) в течение длительного времени облучения. Использование электропечей связано с необходимостью постоянного обслуживания в течение всего времени эксперимента. Представляется целесообразным использовать для поддержания повышенной (и высокостабильной) температуры радиационный разогрев

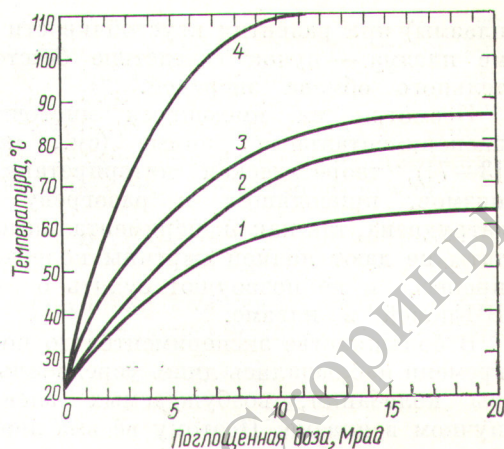


Рис. 5. Радиационный разогрев объектов, помещенных в теплоизолированную [цилиндрическую] емкость:

1, 2 — полиметилметакрилат (диаметр 30 и 60 мм); 3 — дюралюминий (60 мм); 4 — сталь (60 мм); мощность поглощенной дозы (Мрад/ч): 1 и 2 — 2,2; 3 — 1,7; 4 — 1,3.

объектов. Подбором соответствующих условий облучения можно обеспечить поддержание практически любой температуры от комнатной до  $\sim 200^\circ$  С. При этом после достижения установившегося теплового режима нет необходимости даже в контроле температуры объекта. В качестве примера на рис. 5 приведена зависимость изменения температуры от поглощенной дозы для различных объектов, помещенных в теплоизолированную емкость, подобную электропечи без обогрева.

Поступила в Редакцию 5/IX 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твердых тел. М., «Наука», 1964.
2. С. С. Кутателадзе, В. М. Боршанский. Справочник по теплопередаче. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

## Статистические характеристики ВЧ-колебаний, возбуждаемых при развитии неустойчивости в системе плазма — пучок

Ю. Г. ЯРЕМЕНКО, В. М. ДЕЕВ, Р. Л. СЛАБОВИК, И. Ф. ХАРЧЕНКО

УДК 533.93

Экспериментальные исследования физических процессов, имеющих место при взаимодействии электронных пучков с плазмой, представляют значительный интерес в связи с развитием работ по плазменной электронике сверхвысо-

ких частот [1] и исследований, связанных с проблемой термоядерного синтеза [2].

В последнем случае особенно интересны исследования возможности передачи энергии от электронов пучка частицам плазмы (нагрев