

Рис. 3. Зависимость импульса положительной фазы сжатия от относительного расстояния. 1 — $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$; 2 — $2\text{H}_2 + \text{O}_2$; 3 — [3].

ли (1)–(3) (сплошные линии), примерно на 30% больше значений импульсов, полученных по модели [1, 2] (штриховые линии), и лучше коррелируют с экспериментом.

Представляет интерес величина коэффициента полезного действия взрыва $\eta = W_1/W$, определяемого как отношение энергии W_1 , перешедшей в волну при максимальном расширении ПД к полной энергии, заключенной первоначально в смеси. Ясно, что $\eta = 1 - U/U_0$, и в соответствии с данными табл. 2 находим для $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ $\eta \approx 34\%$, а для $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ $\eta \approx 32\%$. Таким образом, для кислородных смесей только третья часть полной энергии взрыва совершает работу над окружающим воздухом.

В заключение автор выражает благодарность В. В. Митрофанову за ряд критических замечаний.

Поступила в редакцию 30/IV 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Ждан. ПМТФ, 1975, 6.
2. В. D. Fishburn. Acta Astron., 1976, 3, 11–12.
3. С. А. Когарко, В. В. Адушкин, А. Г. Лямин. НТПГВ, 1965, 1, 2.
4. R. W. Woolfolk, C. M. Ablow. — In: Proc. Conf. Mech. Explos. and Blast Waves. Feltman Research Laboratory, Picatinny Arsenal, Dover, N. Y., 1973.
5. Ю. А. Николаев. ФГВ, 1978, 14, 4.
6. К. П. Станюкович. Неуставившиеся движения сплошной среды. М.: Наука, 1971.
7. Ю. А. Николаев, П. А. Фомин. ФГВ, 1982, 18, 1.
8. Ю. А. Николаев, М. Е. Толчиня. ФГВ, 1977, 13, 3.
9. С. К. Годунов, А. В. Забродин и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
10. С. А. Ждан, В. И. Феденок. — В кн.: Динамика сплошной среды. Вып. 51. Новосибирск, 1981.

ДИНАМИКА ТЕПЛОБМЕНА ГАЗОВ В ПОДЗЕМНОЙ ПОЛОСТИ

Е. Г. Басанский, Н. А. Кудряшов, А. Л. Моисеев, В. И. Некрасов
(Москва)

Исследование процессов теплообмена газообразных продуктов в полости подземного взрыва проводилось в работах [1–3]. Результаты измерения давления газов в полости приведены в [1]. Аналитическое решение задачи о температуре и давлении продуктов взрыва в полости с учетом процессов имплозии (вбрасывания) вещества расплава в газ полости получено в [2]. Численное исследование температуры и давления газов в полости взрыва с учетом процессов теплообмена, конденсации тугоплавкого компонента и утечки проводилось в [3].

В настоящей работе исследование процессов теплообмена газов в полости проводится для безводных и газонасыщенных силикатных пород. Следуя [3, 4], предположим, что продукты термического разложения горной породы состоят из тугоплавкого компонента (SiO_2), паров воды и летучего компонента (CO_2). После окончания стадии расширения при подземном взрыве образуется полость с газообразными продуктами при высокой температуре и давлении [4, 5]. Остывание газообразных продук-

тов взрыва в полости рассмотрим при предположениях, аналогичных [3].

Температура газов в полости подземного взрыва описывается уравнением сохранения энергии [3]

$$\frac{dE}{dt} = -4\pi R_1^2 \sigma [\varepsilon_1 T^4 - \varepsilon_2 T_c^4] + \frac{dM}{dt} \int_0^{T_c} c_V(T) dT. \quad (4)$$

Здесь E — внутренняя энергия газов в полости; R_1 — радиус полости взрыва (граница зоны газ — расплав); T — температура газов; T_c — температура испарения SiO_2 ; M — масса газа в полости; ε_1 и ε_2 — степени черноты газа и расплава; σ — постоянная Стефана — Больцмана; c_V — теплоемкость газа при постоянном объеме. Уравнение изменения массы испаренной породы без утечки газа из полости имеет вид

$$L_1 \frac{dM}{dt} = 4\pi R_1^2 \left[\sigma (\varepsilon_1 T^4 - \varepsilon_2 T_c^4) + \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_1} \right], \quad (2)$$

где L_1 — теплота испарения SiO_2 ; λ_1 — коэффициент теплопроводности расплава SiO_2 ; $T_1(r, t)$ — температура расплавленной породы.

Учитывая, что $E = E_0 + M \int_0^T c_V(T) dt$, из (1), (2) получим

$$M c_V(T) \frac{dT}{dt} = -4\pi R_1^2 \left\{ \sigma [\varepsilon_1 T^4 - \varepsilon_2 T_c^4] \left[1 + \frac{\int_0^T c_V(T) dt}{L_1} \right] + \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_1} \int_0^T c_V(T) dT \right\}. \quad (3)$$

Радиус полости (граница газ — расплав) определяется из уравнения

$$4\pi R_1^2 \frac{\partial R_1}{\partial t} = (\rho_e - \rho) 4\pi R_2^2 \frac{dR_2}{dt} + \frac{dM}{dt}, \quad (4)$$

где ρ_e и ρ — плотности жидкой и твердой фаз.

Движение границы фазового перехода твердое тело — расплав определяется выражением [3]

$$\rho L_2 \frac{dR_2}{dt} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{R_2} + \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{R_2}. \quad (5)$$

Здесь L_2 — удельная теплота плавления породы; λ_2 — коэффициент теплопроводности породы; T_2 — температура твердой фазы.

Система уравнений (3)–(5) замыкается уравнениями теплопроводности в расплавленной и раздробленной породе

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\kappa_1}{r} \frac{\partial^2 (rT_1)}{\partial r^2}, \quad 0 < t < \infty, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad (6)$$

$$T_1(R_1, t) = T_c, \quad T_1(R_2, t) = T_M, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\kappa_2}{r} \frac{\partial^2 (rT_2)}{\partial r^2}, \quad 0 < t < \infty, \quad R_2 < r < \infty, \quad (8)$$

$$T_2(R_2, t) = T_M, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} T_2(r, t) = T_f \quad (9)$$

и начальными условиями

$$M(t=0) = M_0, \quad R_1(t=0) = R_{10}, \quad T(t=0) = T_0, \quad R_2(t=0) = R_{20}. \quad (10)$$

В (6)–(10) κ_1 и κ_2 — коэффициенты температуропроводности расплавленной и твердой породы; T_M — температура плавления SiO_2 ; T_f — фоновая температура; T_0 — начальная температура газов в полости. Началь-

ное распределение температуры в слое расплава и в разрушенной породе принималось аналогично [3].

Система уравнений (2)–(5), (6), (8) с начальными и граничными условиями (7), (9) описывает остывание газа в полости до начала конденсации тугоплавкого компонента породы.

По мере остывания газа в полости влияние процессов радиационного теплообмена уменьшается. Пар тугоплавкого компонента горной породы достигает состояния насыщения, и дальнейшее остывание газа определяется теплопроводностью в зоне расплава и тепловыделением при конденсации. Изменение температуры при этом описывается следующим уравнением:

$$\frac{dT}{dt} \left\{ M_{LC} c_L + M_g c_g + \frac{dM_g}{dt} \left[L_1 + \int_0^T (c_g - c_L) dT \right] \right\} = -S \lambda_1 \frac{T_c - T_M}{d}, \quad (14)$$

где S — эффективная поверхность теплообмена; M_g , M_L — массы пара и жидкой фазы; d — средняя толщина слоя расплава; c_g и c_L — теплоемкости газообразной и жидкой фазы.

Давление газа в полости будет изменяться в соответствии с кривой насыщения пара SiO_2 [6, 7]: $p_s = \exp(a - b/T)$, где a , b — константы.

Изменения массы пара и массы расплава удовлетворяют уравнениям

$$\frac{dM_g}{dt} = \frac{M_g}{T} \left(\frac{b}{T} - 1 \right) \frac{dT}{dt}, \quad (12)$$

$$\frac{dM_L}{dt} = \frac{S \left(\lambda_1 \frac{T_c - T_M}{d} + \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{R_2} \right)}{L_2 + \int_{T_M}^T c_L(T) dT} - \frac{dM_g}{dt}. \quad (13)$$

Температура твердой фазы T_2 определяется из уравнения (8).

В случае утечки газа полости уравнение для температуры (без учета теплопроводности) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} \left\{ M_{LC} c_L + M_g c_g + \frac{dM_g}{dt} \left[L_1 + \int_0^T (c_g - c_L) dT \right] \right\} = \\ = -\frac{S^* u}{V} \left\{ M_g \left[L_1 + \int_0^T (c_g - c_L) dT \right] \right\}, \end{aligned} \quad (14)$$

где S^* — поверхность утечки; V — объем полости; u — скорость утечки на границе полости. Изменение массы газа в этом случае описывается уравнением (13), а зависимость массы расплава (жидкой фазы) от времени можно представить в виде

$$\frac{dM_g}{dt} = -\frac{dM_L}{dt} - \frac{S^* u}{V} M_g = -M_g \left[\frac{1}{T} \left(\frac{b}{T} - 1 \right) \frac{dT}{dt} + \frac{S^* u}{V} \right]. \quad (15)$$

В уравнениях (14), (15) потерями тепла из-за теплопроводности пренебрегаем по сравнению с потерями тепла из-за утечки газа из полости [3].

Решение системы уравнений, описывающих изменение температуры, давления, плотности газов и массы расплавленной породы проводилось численно с использованием конечно-разностных методов решения дифференциальных уравнений [8]. Скорость утечки газов из полости определялась из решения задачи фильтрации газов через трещиновато-пористую среду по расчетной методике, предложенной в [10, 11]. В результате численного решения системы уравнений, описывающей динамику теплообмена газа в полости подземного взрыва в безводной силикатной породе, получены зависимости от времени, температуры и давления газа, количества испаренного и расплавленного грунта. Масса первоначально испаренного грунта оценивалась величиной $M_0 = 70$ [2], масса

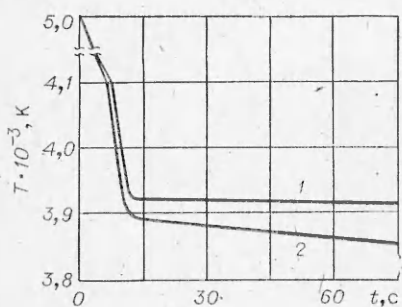


Рис. 1. Зависимость температуры газа в полости для силикатной породы от времени без учета утечки газов из полости.

1 — $\lambda_1 = 8$ Вт/м; 2 — $\lambda_1 = 80$ Вт/м.

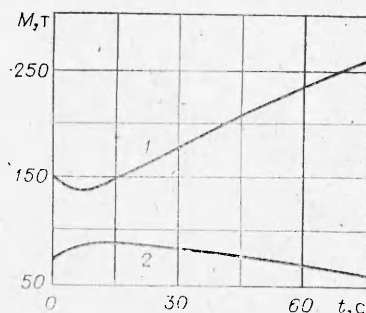


Рис. 2. Количество расплавленной (1) и испаренной (2) породы.

расплава, образованного ударной волной, принималась равной $M_p = 150$ [12]. При учете радиационного теплообмена газ считается излучающим как абсолютно черное тело $\epsilon_1 = 1$, а степень черноты поверхности полости принимается равной $\epsilon_2 = 0,9$.

Значения констант кривой насыщения с учетом разложения пара на SiO_2 и O_2 : $a = 31,23$ и $b = 60\,639$ К [6]; величина теплоты испарения $L_1 = 8 \cdot 10^6$ Дж/кг; значения остальных физических параметров [6, 7, 9, 12]: $c_L = 1,50$, $c_{LV} = 1,15$ кДж/(кг·град), $\lambda_2 = 4$ Вт/(м·град), $R_0 = 12$ м, $\rho_e = 3,0 \cdot 10^3$, $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, $L_2 = 1,76 \cdot 10^5$ Дж/кг.

На рис. 1 изображена зависимость температуры газа в полости в безводной силикатной породе от времени без учета утечки газов из полости. Изменение температуры в первые 12 с обусловлено процессом радиационного теплообмена газа с поверхностью расплава. Далее уменьшение температуры происходит из-за насыщения паров испаренной породы и начала конденсации, сопровождающейся большим тепловыделением. Основная часть теплового потока идет на смещение границы фазового перехода расплав — твердая порода. При этом распределение температуры по породе практически не изменяется, а лишь сдвигается в соответствии с перемещением зоны плавления.

Величина коэффициента теплопроводности жидкой фазы силикатной породы в численных расчетах варьировалась в пределах от 8 до 80 Вт/(м·град). Результатам расчетов, проведенных для двух крайних значений коэффициента теплопроводности, соответствуют кривые 1 и 2 на рис. 1. Видно, что погрешность величины λ_1 для жидкой фазы силикатного грунта [7] не оказывает влияния на температуру газа в полости.

Рис. 2 показывает изменение количества расплавленной и испаренной породы в полости подземного взрыва из-за процессов испарения, конденсации и плавления. Увеличение массы газа в первые 10 с объясняется дополнительным испарением слоя расплава.

Некоторые результаты исследования влияния теплосодержания расплава на изменение температуры и давления газа при утечке газообразных продуктов взрыва из полости представлены на рис. 3. Полость в данном случае считалась теплоизолированной и поверхностью утечки была вся ее поверхность. Кривая 2 показывает изменение массы газа в случае отсутствия фазового перехода при охлаждении газообразного вещества SiO_2 из-за

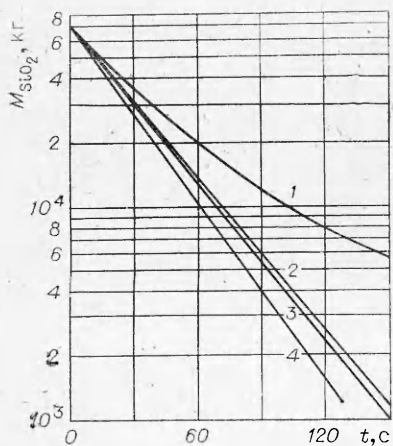


Рис. 3. Изменение массы газообразного SiO_2 в полости от времени при утечке газов из полости.

расширения. Изменение массы паров SiO_2 , которые в начальный момент являются насыщенными, характеризуется кривой 3. При таком условии утечка сопровождается конденсацией пара до наступления фазового равновесия с расплавом, после чего последний начинает испаряться. Кривая 1 показывает изменение массы газообразного SiO_2 , когда в начальный момент времени масса газообразной фазы SiO_2 составляет 70 т, а масса расплава — 300 т. Вид кривой объясняется дополнительным испарением расплавленной породы при утечке насыщенного пара. Кривая 4 соответствует расчетам, проведенным по методике, описанной в [3], где не учитывалась сконденсировавшаяся при утечке масса пара.

Рассмотрим теплообмен в полости взрыва, проведенного в породе, содержащей воду или другие химические соединения, образующие газообразные продукты при термическом разложении. Целостность слоя расплава, покрывающего стенки полости после окончания ее расширения, в этом случае будет нарушена из-за интенсивного газовыделения [2]. Превышение давления газов в расплавленной породе над давлением газов в полости [2] приводит к их быстрому расширению и движению расплава по направлению к центру полости (присоединению или вбрасыванию в полость). В результате перемешивания расплавленной породы с газом полости поверхность теплообмена значительно увеличится, так как теплообмен будет происходить не в тонком слое расплава, а по всему объему, занимаемому газом.

Из приведенной в [2] зависимости отношение равновесных объемов газ — жидкость от температуры для модельных силикатных грунтов $n\text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O}$ следует, что температура начала имплозии T_b равна 1900 К. Расширение газов, входящих в состав расплава, начинается в момент окончания роста полости и продолжается некоторое время после ее стабилизации. Длительность процесса перемешивания оценивается величиной $t^* = 10 \cdot R_1^{-1}$ [2], где t^* — время перемешивания, R_1 — радиус полости после ее остановки. На начальной стадии перемешивания расплав, вовлеченный в полость, будет полностью испаряться, что приведет к быстрому насыщению тугоплавкого компонента. Далее перемешивание будет сопровождаться конденсацией SiO_2 .

Зная долю энергии взрыва, выделившуюся в виде тепла [2], и считая, что вся зона тепловыделения охвачена перемешиванием, запишем уравнение, выражающее закон сохранения энергии при условии установления теплового равновесия между газом и расплавом:

$$\alpha W = (M_0 + M_p)(\gamma_1 c_L + \gamma_2 c_{2V} + \gamma_3 c_{3V}) T_x + M_x (L_1 - (c_L - c_{1V}) T_x), \quad (16)$$

где α — доля всей энергии взрыва, перешедшая в тепло (для различных пород α изменяется в пределах от 0,4—0,6); W — полная энергия, выделившаяся при взрыве; M_p и M_0 — массы первоначально расплавленной и испаренной породы; $\gamma_{1,2,3}$ — процентное содержание SiO_2 , H_2O , CO_2 ; c_{1V} , c_{2V} , c_{3V} — теплоемкости компонентов при постоянном объеме; T_x — температура газа в полости после установления термодинамического равновесия; $M_x = V \mu / AT_x \exp(a - b/T_x)$ — масса пара при температуре T_x . Решая уравнение (16) относительно T_x , определим температуру в полости в момент окончания процесса имплозии расплава.

Давление газов в полости определяется как сумма парциальных давлений компонентов

$$p = \sum_{j=1}^3 p_j = \frac{AT_x}{V} (M_0 + M_p) \left(\frac{\gamma_2}{\mu_2} + \frac{\gamma_3}{\mu_3} \right) + \exp\left(a - \frac{b}{T_x}\right). \quad (17)$$

При газовыделении продукты в полости имеют достаточно высокую температуру, что приводит к прогреву поверхностного слоя расплава путем лучистого теплообмена до температуры, при которой он будет вовлечен в процесс имплозии.

Процесс газовыделения будет протекать до тех пор, пока температура смеси (выделяющихся газов, увлекаемого в движение расплава и га-

зообразных продуктов в полости) не будет ниже T_b . До этого момента изменение температуры парогазовой смеси определяется из закона сохранения энергии

$$\frac{dT}{dt} \left\{ c_L \dot{M}_L + \sum_{j=1}^3 c_{jV} M_j + \frac{dM_1}{dt} [L_1 - (c_L - c_{1V}) T] \right\} =$$

$$= -4\pi R^2 \sigma (\varepsilon_1 T^4 - \varepsilon_2 T_b^4) \left[1 + \frac{\gamma_1 c_L (T - T_b)}{E_w + \sum_{j=1}^3 \gamma_j c_{jP} (T - T_b)} \right]. \quad (18)$$

Здесь M_j — масса газообразного j -го компонента смеси; M_1 — масса расплавленного SiO_2 ; $E_w = c(T_b - T_f) + L_2$ — энергия, необходимая для нагрева единицы массы породы от фоновой температуры $T_f = 300$ К до температуры T_b ; L_1 и L_2 — теплоты испарения и плавления SiO_2 ; c_{2P} и c_{3P} — теплоемкости H_2O и CO_2 при постоянном давлении. Изменение массы породы, вовлекаемой в перемешивание, определяется уравнением

$$\frac{dM}{dt} = \frac{4\pi R^2 \sigma (\varepsilon_1 T^4 - \varepsilon_2 T_b^4)}{E_w + \sum_{j=1}^3 \gamma_j c_{jP} (T - T_b)}. \quad (19)$$

Для изменения масс H_2O и CO_2 справедливы соотношения $\frac{dM_i}{dt} = \gamma_j \frac{dM}{dt}$, $j = 2, 3$. Масса расплава определяется по уравнению $\frac{dM_L}{dt} = \gamma_1 \frac{dM}{dt} - \frac{dM_1}{dt}$, где $\frac{dM_1}{dt}$ аналогично (12), а радиус полости — по $4\pi \rho_e R^2 \frac{dR}{dt} = \frac{dM}{dt}$, где ρ_e — плотность расплавленной породы.

Система уравнений (16)–(19) описывает изменение температуры и давления в системе газ — расплав до окончания процесса имплозии на стенках полости. Далее при отсутствии разгерметизации полости остывание газа происходит из-за теплопроводности через ее стенки.

Решение задачи теплообмена в полости для газодосодержащего грунта определяется расчетом первичного перемешивания продуктов в процессе имплозии (17) и расчетом перемешивания, вызванного лучистым теплообменом (18), (19).

В результате численного решения дифференциальных уравнений (17)–(19) получены зависимости температуры и давления газов в полости от времени для пород следующих составов: $\text{SiO}_2 + 1\% \text{H}_2\text{O} + 1\% \text{CO}_2$, $\text{SiO}_2 + 1\% \text{H}_2\text{O} + 10\% \text{CO}_2$, $\text{SiO}_2 + 10\% \text{H}_2\text{O} + 1\% \text{CO}_2$, а также изменения массы породы, вовлеченной в процесс перемешивания.

На рис. 4 показано изменение давления смеси газов в полости подземного взрыва для указанных выше составов горных пород. Отличие в поведении кривых характеризуется содержанием воды в составе горной породы. Ход кривых на рис. 4 показывает, что в первые 60 с после взрыва происходит конденсация тугоплавкого компонента породы.

Расчеты показали, что для остывания газов в полости подземного взрыва в случае газодосодержащих пород учет теплообмена расплава с газом полости в процессе перемешивания приводит к увеличению скорости остывания газов на начальной стадии ($t < 60$ с). На поздней

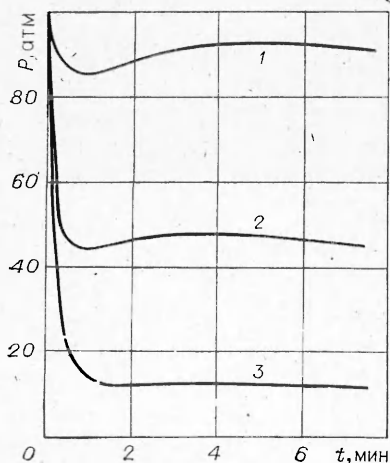


Рис. 4. Изменение давления смеси газов в полости подземного взрыва от времени для пород различного содержанием газа и воды. 1 — 10% H_2O , 1% CO_2 ; 2 — 1% H_2O , 10% CO_2 ; 3 — 10% H_2O , 1% CO_2 .

стадии ($t \approx 60$ с) скорость остывания газов в полости замедляется, время конденсации SiO_2 увеличивается, продолжительность процесса имплозии возрастает в 6—7 раз.

Из анализа полученных результатов можно сделать ряд заключений о характере изменения термодинамических характеристик газов в полости. Величина давления в полости подземного взрыва существенно зависит от содержания воды в горной породе. Так, увеличение водного содержания до 10% при учете имплозии приводит к возрастанию давления в полости, несмотря на уменьшение температуры. Содержание углекислого газа до 10% в составе породы оказывает меньшее влияние на величину давления газов в полости. В случае пород с низким газоводосодержанием необходимо учитывать теплообмен утечки из полости. Получено, что остывание газа в полости подземного взрыва не чувствительно к неточности в определении коэффициента теплопроводности расплава.

*Поступила в редакцию 4/XI 1981,
после доработки — 26/III 1982*

ЛИТЕРАТУРА

1. C. W. Olsen. J. Geophys. Res., 1967, 72, 20.
2. C. E. Chapin. Symposium on Engineering with Nuclear Explosion. Las Vegas, Nevada, 14—16 January, 1970.
3. В. А. Егоров, В. М. Колобашкин, Н. А. Кудряшов. ФГВ, 1979, 15, 5.
4. Ю. А. Израэль. Мирные ядерные взрывы и окружающая среда. Л.: Недра, 1974.
5. Г. В. Джонсон и др. Подземные ядерные взрывы. М.: ИЛ, 1962.
6. Р. Кубо. Термодинамика. Современный курс с задачами и решениями. М.: Мир, 1970.
7. Н. А. Топоров, В. П. Барзаковский. Высокотемпературная химия силикатных и других окисных систем. ИСХ им. Гребенщикова АН СССР. М., 1963.
8. С. К. Годунов, В. С. Рябенский. Разностные схемы. М.: Наука, 1973.
9. В. Н. Бабушкин и др. Термодинамика силикатов. М., 1972.
10. В. В. Адушкин, П. Б. Каазик. ПМТФ, 1976, 1.
11. А. Г. Бондаренко, Н. А. Кудряшов. — В кн.: Экспериментальные методы ядерной физики. Вып. 7. М.: Атомиздат, 1978.
12. G. H. Higgins, T. R. Butkovich. Effect of Water Content, Yield, Medium and Depth of Burst on Cavity Radii, UCRL — 50203, 1967.