§6.2.ÄÈÍÀÌÈ×ÅÑÊÈÉ ÑÄÂÈÃ ÒÎ×ÊÈ ÊÈÏÅÍÈß ÌÅÒÀËËÀ ÏÐÈ ËÀÇÅÐÍÎÌ ÂÎÇÄÅÉÑÒÂÈÈ.

Äîñòèæåíèå “ãëóáîêèõ” ìåòàñòàáèëüíûõ ñîñòîÿíèé âåùåñòâà ïðåäñòàâëÿåò èçâåñòíûå ýêñïåðèìåíòàëüíûå òðóäíîñòè[140]. Ëàçåðíîå âîçäåéñòâèå ïîçâîëÿåò îñóùåñòâèòü îñîáûé, íàçûâàåìûé îïòîòåðìîäèíàìè÷åñêèì[141,142], ìåòîä èññëåäîâàíèÿ òàêèõ ñîñòîÿíèé. Óñëîâèåì èõ äîñòèæåíèÿ ÿâëÿåòñÿ ìàëîñòü äëèòåëüíîñòè ëàçåðíîãî èìïóëüñà ïî ñðàâíåíèþ ñî âðåìåíåì ðàçãðóçêè ìåòàñòàáèëüíûõ ñîñòîÿíèé è åãî äîñòàòî÷íî âûñîêàÿ ìîùíîñòü. Ñ òî÷êè çðåíèÿ îïòîòåðìîäèíàìèêè ïðåäñòàâëÿåòñÿ íàèáîëåå ïðåäïî÷òèòåëüíûì èìïóëüñíûé íàãðåâ ñðåäû. Îäíàêî â ïðîöåññå ëàçåðíîãî âîçäåéñòâèÿ ïàðàìåòðû ñðåäû (òàêèå êàê êîýôôèöèåíò ïîãëîùåíèÿ ñâåòà, êîýôôèöèåíò òåïëîïðîâîäíîñòè è ò.ä.) ìîãóò ñóùåñòâåííûì îáðàçîì èçìåíÿòüñÿ. Ýòî ïðèâîäèò ê òàê íàçûâàåìîé òåïëîâîé íåëèíåéíîñòè (ñì., íàïðèìåð,[142]). Ïðè êîëè÷åñòâåííûõ ðàñ÷åòàõ ýôôåêòèâíîñòè ëàçåðíîãî âîçäåéñòâèÿ íåîáõîäèì ó÷åò ýòîãî ýôôåêòà.

Äèíàìèêà èçìåíåíèÿ ôàçîâîãî ñîñòîÿíèÿ ñðåäû ïðè âîçäåéñòâèè îïðåäåëÿåòñÿ íå òîëüêî “ìãíîâåííûì ïîëåì òåìïåðàòóð ñðåäû”, íî è ïîëåì ìåõàíè÷åñêèõ íàïðÿæåíèé, à òàêæå âíåøíèõ íàãðóçîê.Çàâèñèìîñòü îò äàâëåíèÿ, â ñîîòâåòñòâèè ñ çàêîíîì Êëàïåéðîíà-Êëàóçèóñà, âåñüìà ñóùåñòâåííà. Â ñâîþ î÷åðåäü, äàâëåíèå â ïðèïîâåðõíîñòíîé îáëàñòè ñêëàäûâàåòñÿ èç íàïðÿæåíèé, îáóñëîâëåííûõ òåïëîâûì ðàñøèðåíèåì ñðåäû â çîíå âîçäåéñòâèÿ ëàçåðíîãî èçëó÷åíèÿ, è äàâëåíèÿ ïàðîâ â ïåðåõîäíîì ñëîå. Îïðåäåëÿþùåå âëèÿíèå íà âåëè÷èíó äàâëåíèÿ îêàçûâàþò óñëîâèÿ ìåõàíè÷åñêîãî íàãðóæåíèÿ ïîãëîùàþùåé ïîâåðõíîñòè (ñâîáîäíà èëè çàêðåïëåíà åå ãðàíèöà) è ñîîòíîøåíèå ìåõàíè÷åñêèõ èìïåäàíñîâ ïðîçðà÷íîé è ïîãëîùàþùåé ñðåä. Àêóñòè÷åñêîå äàâëåíèå è

äàâëåíèå ïàðîâ èñïàðÿåìîãî âåùåñòâà ïðèíöèïèàëüíî ðàçëè÷àþòñÿ â ñâîåì ïðîÿâëåíèè â çàâèñèìîñòè îò ñêîðîñòè òåïëîâûäåëåíèÿ, ïðè÷åì ïåðâîå îïðåäåëÿåòñÿ â îñíîâíîì èíòåíñèâíîñòüþ ñâåòà, à âòîðîå - âëîæåííîé ýíåðãèåé.

Â ýòîì ïàðàãðàôå ðàññìîòðåíî ýêñïåðèìåíòàëüíîå ðåãèñòðèðîâàíèå èçìåíåíèÿ äàâëåíèÿ íà ïîâåðõíîñòè ìåòàëëà ïðè ëàçåðíîì âîçäåéñòâèè ñ âûñîêèì (íàíîñåêóíäíûì) âðåìåííûì ðàçðåøåíèåì è ïðåäïðèíÿòà ïîïûòêà êîëè÷åñòâåííîãî ðàçäåëåíèÿ ýòèõ âêëàäîâ çà ñ÷åò ðàçëè÷èÿ âðåìåííûõ çàâèñèìîñòåé èõ ïðîÿâëåíèÿ.

Ëàçåðíî-èíäóöèðîâàííûå ôàçîâûå ïåðåõîäû ïðè îáúåìíîì òåïëîâûäåëåíèè èññëåäîâàíû äîñòàòî÷íî ïîäðîáíî êàê äëÿ ñâîáîäíîé, òàê è äëÿ çàêðåïëåííîé ïîâåðõíîñòè[26,143-147]. Ïðè ýòîì îòìå÷àëèñü çíà÷èòåëüíûå (âûøå êðèòè÷åñêîé òî÷êè) ïåðåãðåâû ïîâåðõíîñòè è èìïóëüñíûå äàâëåíèÿ áîëåå 1000 àòì. Ëîêàëüíûå ìåõàíè÷åñêèå íàïðÿæåíèÿ â ñðåäå âåñüìà âåëèêè è ïðèâîäÿò ê ñìåùåíèþ òî÷åê ôàçîâûõ ïåðåõîäîâ â îáëàñòü áîëåå âûñîêèõ òåìïåðàòóð. Â ýòèõ ýêñïåðèìåíòàõ ñóùåñòâåííóþ ðîëü èãðàëè ðàçëè÷íûå íåëèíåéíî-îïòè÷åñêèå ýôôåêòû, â ÷àñòíîñòè ïðîñâåòëåíèå ïîãëîùàþùåé ñðåäû[143]. Â ñëó÷àå ïîâåðõíîñòíîãî ïîãëîùåíèÿ (õàðàêòåðíîãî äëÿ ìåòàëëîâ) îñíîâíàÿ òåïëîâàÿ íåëèíåéíîñòü ñâÿçàíà ñ çàâèñèìîñòüþ îò òåìïåðàòóðû êîýôôèöèåíòà îòðàæåíèÿ è òåïëîïðîâîäíîñòè[8,148,149]. Òåîðåòè÷åñêèå è ýêñïåðèìåíòàëüíûå èññëåäîâàíèÿ êèïåíèÿ ìåòàëëîâ ïîä äåéñòâèåì ëàçåðíîãî èçëó÷åíèÿ ïðîâîäèëèñü ðàíåå ïðè ñâîáîäíîé ïîâåðõíîñòè[145,150], ÷òî íå ïîçâîëÿåò çàìåòíî ïðîäâèíóòüñÿ â îáëàñòü ìåòàñòàáèëüíûõ ñîñòîÿíèé., ïîýòîìó çäåñü îñíîâíîå âíèìàíèå óäåëÿåòñÿ ëàçåðíî-èíäóöèðîâàííîìó êèïåíèþ ìåòàëëà â óñëîâèÿõ çàêðåïëåííîé ïîâåðõíîñòè.

Ïîâåðõíîñòíûé èëè îáúåìíûé õàðàêòåð ïîãëîùåíèÿ ñâåòà îïðåäåëÿåòñÿ áåçðàçìåðíûì êîýôôèöèåíòîì[8]:

$$m = \alpha \chi / c_0 ,$$

ãäå α – êîýôôèöèåíò ïîãëîùåíèÿ ñâåòà, c_0 – ñêîðîñòü çâóêà, χ – êîýôôèöèåíò òåìïåðàòóðîïðîâîäíîñòè. Ïðè $m<<1$ â îáëàñòè ýôôåêòèâíî âîçáóæäàåìûõ àêóñòè÷åñêèõ ÷àñòîò òåïëîïðîâîäíîñòü ìàëà è òåîðåòè÷åñêèé àíàëèç òåïëîâîé çàäà÷è ñèëüíî óïðîùàåòñÿ. Â ñëó÷àå $m\sim 1$ òåïëîïðîâîäíîñòü ÿâëÿåòñÿ ñóùåñòâåííîé âåëè÷èíîé âî âñåì äèàïàçîíå âîçáóæäàåìûõ ÷àñòîò è òåîðåòè÷åñêèé ðàñ÷åò òåïëîâîãî ïîëÿ óñëîæíÿåòñÿ. Â ïîñëåäíåì ñëó÷àå (ïîâåðõíîñòíîå ïîãëîùåíèå ñâåòà) â ðàìêàõ òåîðèè âîçìóùåíèÿ[151] àíàëèçèðîâàëîñü ëèøü âëèÿíèå èçìåíåíèÿ â çàâèñèìîñòè îò òåìïåðàòóðû êîýôôèöèåíòà îòðàæåíèÿ ñâåòà ïðè ñèëüíîì ïîâåðõíîñòè. Ó÷åò äèíàìè÷åñêîãî ñäâèãà òî÷êè êèïåíèÿ â ïðîöåññå ëàçåðíîãî âîçäåéñòâèÿ, íàñêîëüêî èçâåñòíî, äî ñèõ ïîð íå ïðîâîäèëñÿ. Ïîýòîìó, öåëü äàííîãî èññëåäîâàíèÿ - òåîðåòè÷åñêèå îöåíêè è ýêñïåðèìåíòàëüíûå èññëåäîâàíèÿ ýòîãî ýôôåêòà.

Â êà÷åñòâå îáúåêòà èññëåäîâàíèÿ áûëà âûáðàíà ðòóòü ïî ñëåäóþùèì ñîîáðàæåíèÿì: ñðàâíèòåëüíî íèçêàÿ òåìïåðàòóðà êèïåíèÿ ðòóòè ïîçâîëÿåò äîñòè÷ü ìåòàñòàáèëüíûõ ñîñòîÿíèé ïðè óìåðåííûõ ýíåðãèÿõ ëàçåðíûõ èìïóëüñîâ; æèäêîå ñîñòîÿíèå ðòóòè ïðè êîìíàòíûõ òåìïåðàòóðàõ äåëàåò âîçìîæíûì ïðîâåäåíèå îïòîàêóñòè÷åñêèõ èçìåðåíèé áåç èñïîëüçîâàíèÿ èììåðñèîííîé ñðåäû; òåïëîôèçè÷åñêèå è îïòè÷åñêèå ñâîéñòâà ðòóòè äîñòàòî÷íî õîðîøî èçó÷åíû â øèðîêîì äèàïàçîíå òåìïåðàòóð. Ïîâåðõíîñòü ðòóòè çàæèìàëàñü êâàðöåâûì ñòåêëîì, ÷òî ïðåïÿòñòâîâàëî îáðàçîâàíèþ ðàñøèðåíèþ ïàðà. Ïðîèñõîäÿùèå íà ïîâåðõíîñòè, îáëó÷àåìîé ëàçåðîì, ïðîöåññû èññëåäîâàëèñü ïî ôîðìå èìïóëüñà äàâëåíèÿ, ðàñïðîñòðàíÿâøåãîñÿ îò ïîâåðõíîñòè â ãëóáü ñðåäû.

Ïðè ïîâåðõíîñòíîì ïîãëîùåíèè ñâåòà ïîëå òåìïåðàòóð â ñðåäå ìîæåò áûòü îïèñàíî óðàâíåíèåì òåïëîïðîâîäíîñòè:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho c_p T'\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(\kappa \frac{\partial T'}{\partial t}\right), \quad (6.2)$$

ãäå T' – ïðèðàùåíèå òåìïåðàòóðû, ρ – ïëîòíîñòü, c_p – óäåëüíàÿ òåïëîåìêîñòü, κ – òåïëîïðîâîäíîñòü ñðåäû. Ïàðàìåòðû ñðåäû, âîîáùå ãîâîðÿ, çàâèñÿò îò òåìïåðàòóðû. Ãðàíè÷íîå óñëîâèå íà ïîãëîùàþùåé ïîâåðõíîñòè (òåïëîîòäà÷åé â ïðîçðà÷íóþ ñðåäó ìîæíî ïðåíåáðå÷ü â ñèëó çíà÷èòåëüíî áîëåå âûñîêîé òåïëîïðîâîäíîñòè ìåòàëëà îòíîñèòåëüíî êâàðöà) çàïèñûâàåòñÿ â âèäå:

$$\kappa \left. \frac{\partial T'}{\partial z} \right|_{z=0} = - I_0 \left(1 - R\left(T' \right) \right) f\left(t \right), \tag{6.3}$$

ãäå I_0 – èíòåíñèâíîñòü ñâåòà, ïàäàþùåãî íà ïîãëîùàþùóþ ïîâåðõíîñòü, R – êîýôôèöèåíò îòðàæåíèÿ èçëó÷åíèÿ, ôóíêöèÿ $f\left(t \right)$ – îïèñûâàåò çàâèñèìîñòü èíòåíñèâíîñòè ëàçåðíîãî èìïóëüñà îò âðåìåíè. Íà âðåìåíàõ ïîðÿäêà äëèòåëüíîñòè ëàçåðíîãî èìïóëüñà äèôôóçèÿ òåïëà ïîïåðåê ïó÷êà íåñóùåñòâåííà, ïîýòîìó ìîæíî îãðàíè÷èòüñÿ ðàññìîòðåíèåì îäíîìåðíîé ìîäåëè.

Â çàäà÷å (6.2), (6.3) âñå êîýôôèöèåíòû, âîîáùå ãîâîðÿ, çàâèñÿò îò òåìïåðàòóðû è, ïîýòîìó åå ðåøåíèå ìîæåò áûòü ïîëó÷åíî ëèøü ÷èñëåííî. Òåìïåðàòóðíûå êîýôôèöèåíòû ïàðàìåòðîâ äëÿ ðòóòè è èçëó÷åíèÿ YAG:Nd - ëàçåðà ïðè $T = 300\,^{\circ}K$ ïðèâåäåíû â òàáëèöå 6.2. Âèäíî, ÷òî íà òåïëîâîå ïîëå îñíîâíîå âëèÿíèå äîëæíû îêàçûâàòü çàâèñèìîñòè îò òåìïåðàòóðû êîýôôèöèåíòîâ òåïëîïðîâîäíîñòè è îòðàæåíèÿ ñâåòà. Óâåëè÷åíèå ñ ðîñòîì òåìïåðàòóðû êîýôôèöèåíòà òåïëîïðîâîäíîñòè ïðèâåäåò ê óìåíüøåíèþ òåìïåðàòóðû ïîâåðõíîñòè è óâåëè÷åíèþ òîëùèíû ïðîãðåòîãî çà âðåìÿ äåéñòâèÿ ëàçåðíîãî èìïóëüñà ñëîÿ. Óìåíüøåíèå êîýôôèöèåíòà îòðàæåíèÿ ïðè íàãðåâå, íàîáîðîò, ïðèâîäèò ê äîïîëíèòåëüíîìó óâåëè÷åíèþ òåìïåðàòóðû ïîâåðõíîñòè.

Â ïåðâîì ïðèáëèæåíèè, ïðè ïîñòîÿííûõ òåïëîôèçè÷åñêèõ ïàðàìåòðàõ, òåìïåðàòóðíîå ïîëå îïèñûâàåòñÿ âûðàæåíèåì[152]:

$$T'(z,t) = \int_0^{\infty} \frac{I_0(1-R)}{\rho c_p} \frac{\exp\left(-z^2/4\chi\tau\right)}{\sqrt{\pi\chi\tau}} f(t-\tau)\, d\tau, \tag{6.4}$$

ïîýòîìó ïðè ñâîáîäíîé ïîâåðõíîñòè êèïåíèå íà÷íåòñÿ, êîãäà $T' > T_b - T_0$, ãäå T_b – òåìïåðàòóðà êèïåíèÿ, T_0 – íà÷àëüíàÿ òåìïåðàòóðà ñðåäû. Àêóñòè÷åñêàÿ íàãðóçêà ïîãëîùàþùåé ïîâåðõíîñòè (êîãäà àêóñòè÷åñêèå èìïåäàíñû ïîãëîùàþùåé è ïðîçðà÷íîé ñðåä ñðàâíèìû) ïðèâîäèò ê òîìó, ÷òî îäíîâðåìåííî ñ íàãðåâîì ïðîèñõîäèò çíà÷èòåëüíîå ïîâûøåíèå äàâëåíèÿ è ñîîòâåòñòâóþùåå ñìåùåíèå òî÷êè êèïåíèÿ. Çàâèñèìîñòü òåìïåðàòóðû êèïåíèÿ îò äàâëåíèÿ ìîæíî àïïðîêñèìèðîâàòü ôîðìóëîé (ñì. ðèñ.6.5à):

$$T_b = \frac{T^{(0)}}{\ln\left(p^{(0)}/p\right)}, \tag{6.5}$$

ãäå $T^{(0)} = 7040\,^\circ K$ è $p^{(0)} = 7.54 \bullet 10^9$ Ïà - õàðàêòåðíûå ïàðàìåòðû ðòóòè, ðàññ÷èòàííûå äëÿ àïïðîêñèìàöèè (6.5) ïî òàáëè÷íûì äàííûì[153]. Ñîîòâåòñòâåííî ìîìåíò íà÷àëà êèïåíèÿ îïðåäåëÿåòñÿ èç óñëîâèÿ

$$\int_0^{\infty} \frac{I_0(1-R)}{\rho c_p} \frac{f(t-\tau)}{\sqrt{\pi\chi\tau}}\, d\tau > \frac{T^{(0)}}{\ln\left[p^{(0)}/p(t,z=0)\right]} - T_0 \tag{6.6}$$

è ñóùåñòâåííûì îáðàçîì çàâèñèò îò ôîðìû è äëèòåëüíîñòè ëàçåðíîãî èìïóëüñà.

Àêóñòè÷åñêîå äàâëåíèå $p(t,z=0)$ ìîæåò áûòü íàéäåíî èç ðåøåíèÿ çàäà÷è[8]

$$\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = -\beta\frac{\partial T'}{\partial t}, \tag{6.7}$$

$$\varphi\Big|_{z=0} - \frac{N}{c_0}\frac{\partial\varphi}{\partial t}\Big|_{z=0} = 0, \tag{6.8}$$

ãäå φ – ïîòåíöèàë ïîëÿ ñêîðîñòåé, β – òåìïåðàòóðíûé êîýôôèöèåíò îáúåìíîãî ðàñøèðåíèÿ ñðåäû, $p=-\rho\,\partial\varphi/\partial t$ – äàâëåíèå, $N=\rho c_0/\left(\rho c_0\right)_{tr}$ – îòíîøåíèå àêóñòè÷åñêèõ èìïåäàíñîâ ïîãëîùàþùåé è ïðîçðà÷íîé ñðåä. Ïðè ñðàâíèìûõ àêóñòè÷åñêèõ èìïåäàíñàõ $\left(N\sim1\right)$ äàâëåíèå íà ïîãëîùàþùåé ïîâåðõíîñòè $z=0$ ìîæåò áûòü âûðàæåíî êàê

$$p\left(t,z=0\right)=\frac{I_0\left(1-R\right)}{1+N}\,f\left(t\right)\,\frac{c_0\beta}{c_p}. \tag{6.9}$$

Òàêóþ æå ôîðìó èìååò àêóñòè÷åñêèé èìïóëüñ, ðàñïðîñòðàíÿþùèéñÿ âãëóáü ïîãëîùàþùåé ñðåäû[8], ïîýòîìó ïî ôîðìå è àìïëèòóäå îïòîàêóñòè÷åñêîãî ñèãíàëà ìîæíî ñóäèòü îá èçìåíåíèè äàâëåíèÿ íàïîãëîùàþùåé ïîâåðõíîñòè. Ïðè ïîñòîÿííûõ òåïëîôèçè÷åñêèõ ïàðàìåòðàõ è â îòñóòñòâèå ôàçîâûõ ïåðåõîäîâ âðåìåííàÿ çàâèñèìîñòü äàâëåíèÿ äîëæíà ïîâòîðÿòü ôîðìó ëàçåðíîãî èìïóëüñà (ñì. (6.9)).

Â óñëîâèÿõ íàøèõ ýêñïåðèìåíòîâ (ñì. íèæå) âåëè÷èíà $N=1.6$ è òåìïåðàòóðíûé êîýôôèöèåíò äàâëåíèÿ, ñêëàäûâàþùèéñÿ èç òåìïåðàòóðíûõ êîýôôèöèåíòîâ ñîìíîæèòåëåé â (6.9), îöåíèâàåòñÿ êàê

$$\frac{1}{\left(1-R\right)}\frac{d\left(1-R\right)}{d\,T}+\frac{1}{\left(c_0\,\beta/c_p\right)}\frac{d\left(c_0\,\beta/c_p\right)}{d\,T}+\frac{1}{N}\frac{d\,N}{d\,T}\cong 5.2\bullet10^{-4}\ {}^{\circ}K^{-1} \tag{6.10}$$

è ïðàêòè÷åñêè ñîâïàäàåò ñ òåìïåðàòóðíûì êîýôôèöèåíòîì îòðàæåíèÿ ñâåòà. Òåìïåðàòóðíûå êîýôôèöèåíòû îñòàëüíûõ ïàðàìåòðîâ âçàèìíî êîìïåíñèðóþò äðóã äðóãà, ïîýòîìó ïðè ðàñ÷åòå äàâëåíèÿ â (6.6), ìîæíî ïðåíåáðå÷ü èçìåíåíèåì ïàðàìåòðîâ ñ ðîñòîì òåìïåðàòóðû è îïðåäåëÿòü ìîìåíò íà÷àëà êèïåíèÿ æèäêîñòè ñ ó÷åòîì èçìåíåíèÿ òîëüêî êîýôôèöèåíòà îòðàæåíèÿ ñâåòà, êîòîðûé âïëîòü äî òåìïåðàòóðû êèïåíèÿ èçìåíÿåòñÿ äîñòàòî÷íî ñëàáî (ñì. òàáëèöó 6.2).

Òàáëèöà 6.2

Ïàðàìåòð (x)	Òåìïåðàòóðíûé êîýôôèöèåíò $dx/x\,dT\left(10^{-4}\ {}^\circ K^{-1}\right)$
ρ	-1.8
c_0	-3.5
$1-R$	5.0
κ	26
c_p	ìåíåå 0.1
β	0.43
$c_0\beta/c_p$	-3.4
N	-3.3

Áóäåì èñïîëüçîâàòü ãàóññîâó àïïðîêñèìàöèþ ôîðìû ëàçåðíîãî èìïóëüñà:

$$I(t)=\frac{E_0}{\tau_L\sqrt{\pi}}\,exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_L}\right)^2\right], \tag{6.11}$$

ãäå τ_L - ýôôåêòèâíàÿ äëèòåëüíîñòü ëàçåðíîãî èìïóëüñà. Äàâëåíèå íà ïîâåðõíîñòè (äî ìîìåíòà íà÷àëà êèïåíèÿ) òàêæå èçìåíÿåòñÿ ïî ãàóññîâó çàêîíó:

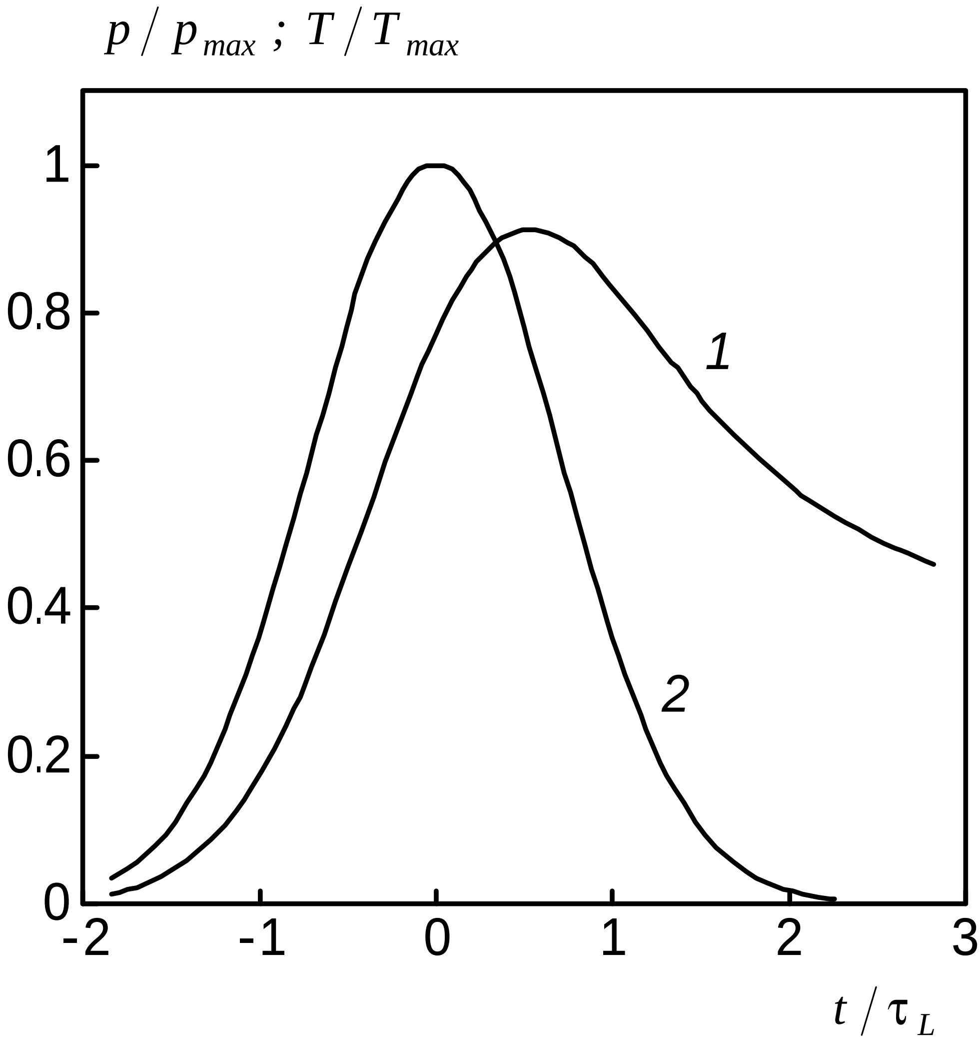
$$p(z=0)=p_0+\frac{c_0\beta}{c_p}\frac{1-R}{1+N}\frac{E_0}{\tau_L\sqrt{\pi}}\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_L}\right)^2\right]. \tag{6.12}$$

Â ñîîòâåòñòâèè ñ ôîðìóëîé (6.4) òåìïåðàòóðà ïîâåðõíîñòè ìîæåò áûòü îïèñàíà âûðàæåíèåì

$$T(z=0)=T_0+\frac{E_0(1-R)}{\rho c_p\sqrt{\chi\tau_L\sqrt{\pi}}}(2\pi)^{-1/4}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\tau_L}\right)^2\right]D_{-1/2}\left(\frac{t\sqrt{2}}{\tau_L}\right), \qquad (6.13)$$

ãäå $D_{-1/2}(\tau)$ – ôóíêöèÿ ïàðàáîëè÷åñêîãî öèëèíäðà.

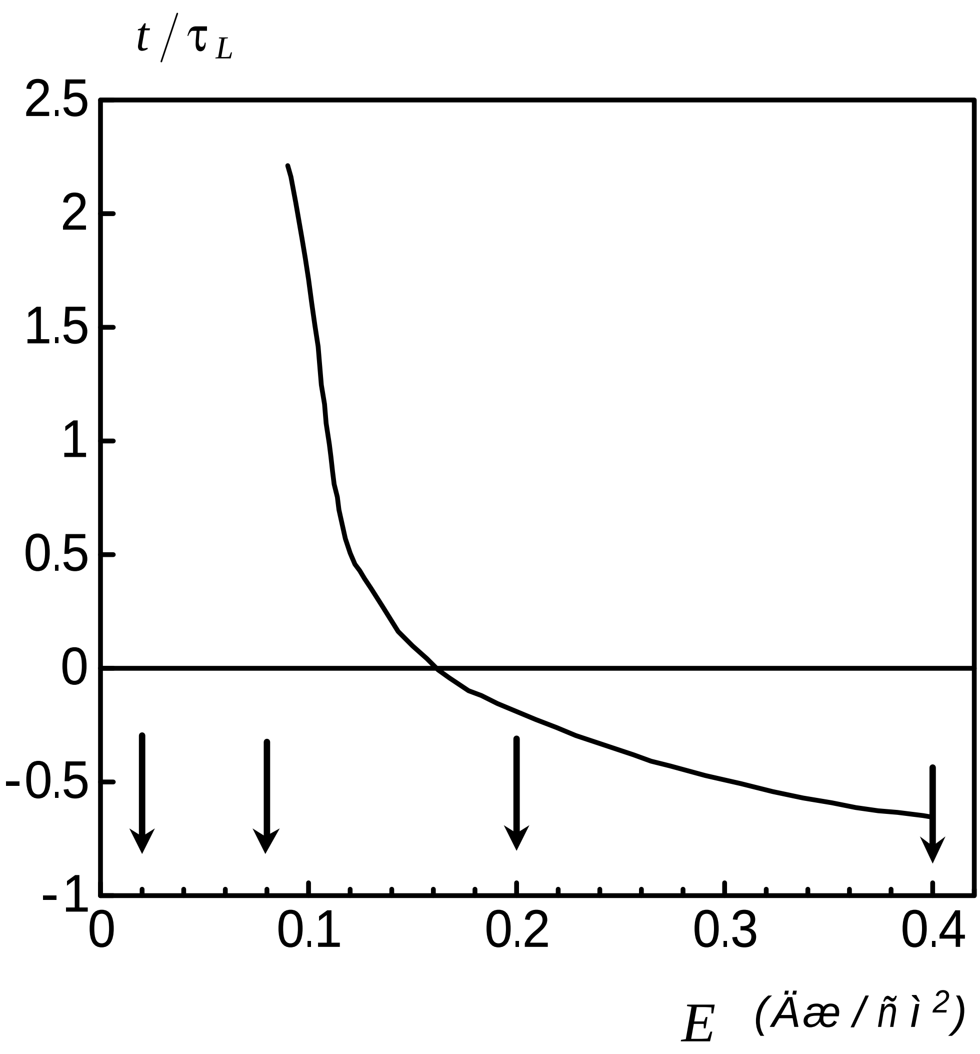
Çàâèñèìîñòè òåìïåðàòóðû è äàâëåíèÿ íà ïîâåðõíîñòè ðòóòè â ïðîöåññå ëàçåðíîãî âîçäåéñòâèÿ ïðåäñòàâëåíû íà ðèñ.6.5á.



Ðèñ.6.5á. Ðàñ÷åòíûå çàâèñèìîñòè òåìïåðàòóðû (*1*) è äàâëåíèÿ (*2*) íà ïîâåðõíîñòè ðòóòè îò âðåìåíè ïðè âîçäåéñòâèè ëàçåðíîãî èìïóëüñà.

Âèäíî, ÷òî ìàêñèìóì òåìïåðàòóðû äîñòèãàåòñÿ â ìîìåíò $t\approx 0.5\tau_L$, êîãäà äàâëåíèå íà ïîâåðõíîñòè åùå íå ñíèçèëîñü äî èñõîäíîãî ðàâíîâåñíîãî çíà÷åíèÿ. Äëÿ óñëîâèé ýêñïåðèìåíòà ($\tau_L = 6$ íñ) ìàêñèìàëüíàÿ òåìïåðàòóðà ïîâåðõíîñòè äîñòèãàåò òî÷êè êèïåíèÿ ðòóòè (ïðè íîðìàëüíîì äàâëåíèè) ïðè ïëîòíîñòè ýíåðãèè ïàäàþùåãî èçëó÷åíèÿ $E_0 = 40$ ìÄæ/ñì^2. Òåì íå ìåíåå ïðè ýòîé ïëîòíîñòè ýíåðãèè êèïåíèå åùå íå íà÷èíàåòñÿ, ïîñêîëüêó òî÷êà êèïåíèÿ áóäåò ñìåùåíà â îáëàñòü áîëåå âûñîêèõ òåìïåðàòóð äîïîëíèòåëüíûì äàâëåíèåì íà ïîâåðõíîñòè. Â ñâÿçè ñ ýòèì î÷åâèäíî, ÷òî êèïåíèå áóäåò íà÷èíàòüñÿ áëèæå ê êîíöó èìïóëüñà, êîãäà óáåãàþùàÿ àêóñòè÷åñêàÿ âîëíà ñíèìàåò èçáûòî÷íîå äàâëåíèå. Èç ðåøåíèÿ óðàâíåíèÿ (6.6) â äàííûõ óñëîâèÿõ ñëåäóåò, ÷òî ïîðîãîâàÿ ïëîòíîñòü ýíåðãèè, ïðè êîòîðîé íà÷èíàåòñÿ êèïåíèå, áóäåò ïðàêòè÷åñêè âäâîå âûøå è ñîñòàâèò $E_0 = 81$ ìÄæ/ñì^2 . Ïðè ýòîì ìàêñèìàëüíàÿ òåìïåðàòóðà ïîâåðõíîñòè ïðåâûñèò 700°C, ÷òî ïî÷òè âäâîå áîëüøå òåìïåðàòóðû êèïåíèÿ.

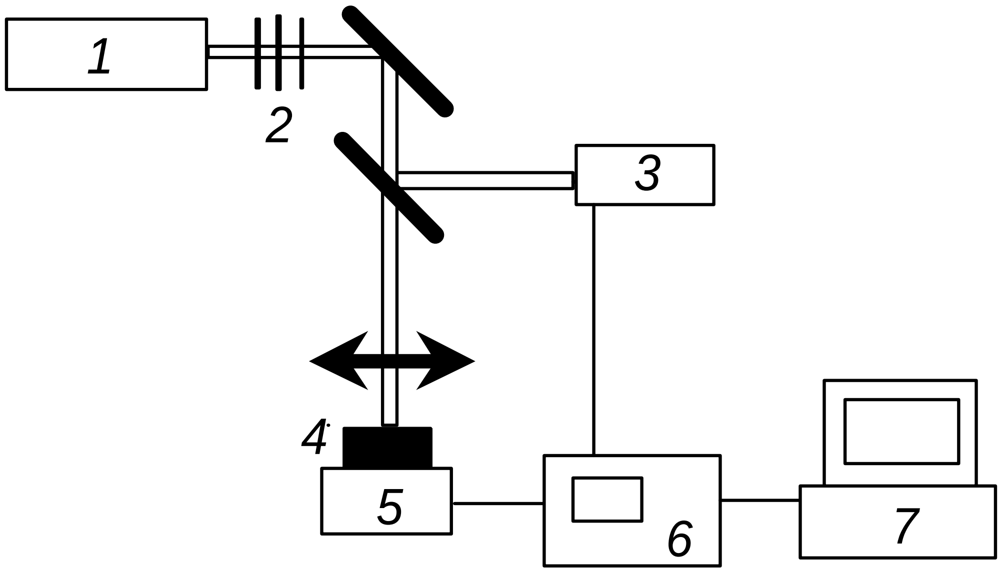
Çàâèñèìîñòü ìîìåíòà íà÷àëà êèïåíèÿ îò ïëîòíîñòè ýíåðãèè (ñâÿçàííàÿ ñ äèíàìè÷åñêèì ñìåùåíèåì òî÷êè êèïåíèÿ) äëÿ äàííûõ ýêñïåðèìåíòàëüíûõ óñëîâèé ïðèâåäåíà íà ðèñ.6.6. Ýòà çàâèñèìîñòü ïîëó÷åíà èç óðàâíåíèÿ (6.6).



Ðèñ.6.6. Ðàñ÷åòíàÿ çàâèñèìîñòü ìîìåíòà íà÷àëà êèïåíèÿ ðòóòè îò ïëîòíîñòè ýíåðãèè ëàçåðíîãî èìïóëüñà. Ñòðåëêàìè ïîêàçàíû èñïîëüçóåìûå â ýêñïåðèìåíòå ïëîòíîñòè ïîòîêà ýíåðãèè ëàçåðíîãî èìïóëüñà.

Âèäíî, ÷òî ïðè ïëîòíîñòÿõ ýíåðãèè 81 ìÄæ/ñì$^2 < E_0 < 130$ ìÄæ/ñì^2 ìîìåíò íà÷àëà êèïåíèÿ áûñòðî ñìåùàåòñÿ ê ñåðåäèíå ëàçåðíîãî èìïóëüñà $(t=0)$. Ïðè äàëüíåéøåì óâåëè÷åíèè ïëîòíîñòè ýíåðãèè ñìåùåíèå çàìåäëÿåòñÿ. Ñòðåëêàìè îòìå÷åíû ïëîòíîñòè ëàçåðíîé ýíåðãèè, äëÿ êîòîðûõ íèæå ïðèâåäåíû ýêñïåðèìåíòàëüíî ïîëó÷åííûå ïðîôèëè îïòîàêóñòè÷åñêèõ ñèãíàëîâ.

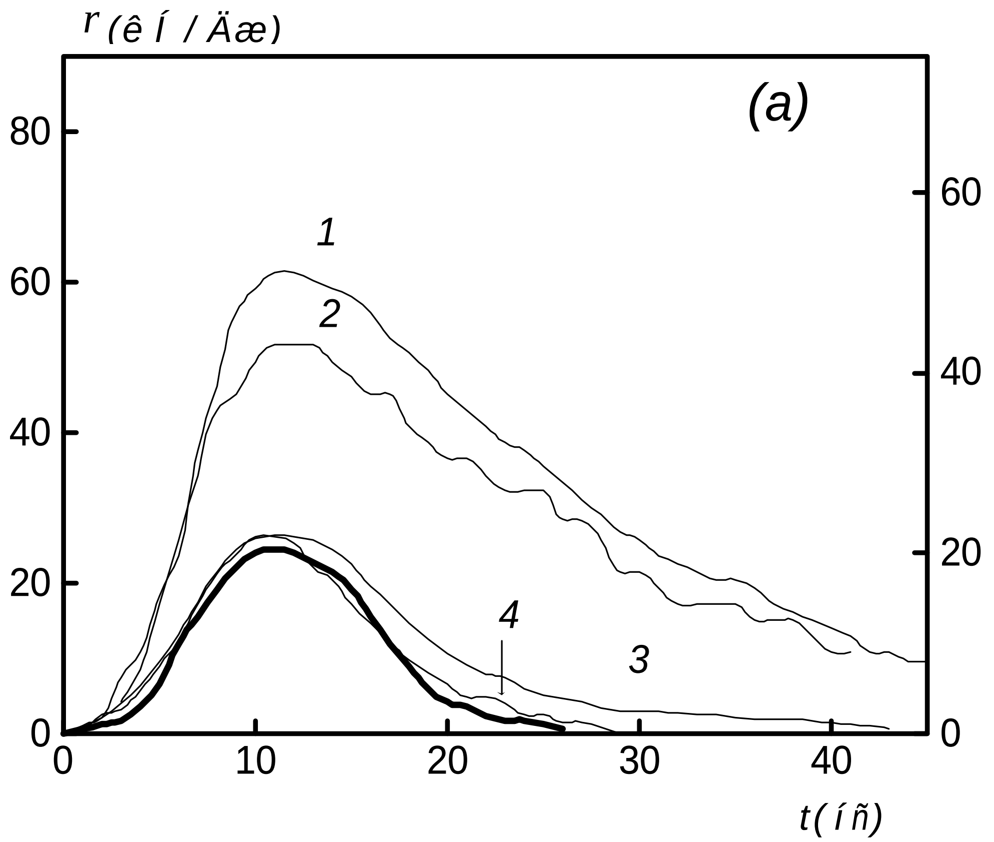
Ýêñïåðèìåíòû ïðîâîäèëèñü íà óñòàíîâêå, ñõåìà êîòîðîé ïðèâåäåíà íà ðèñ.6.7.

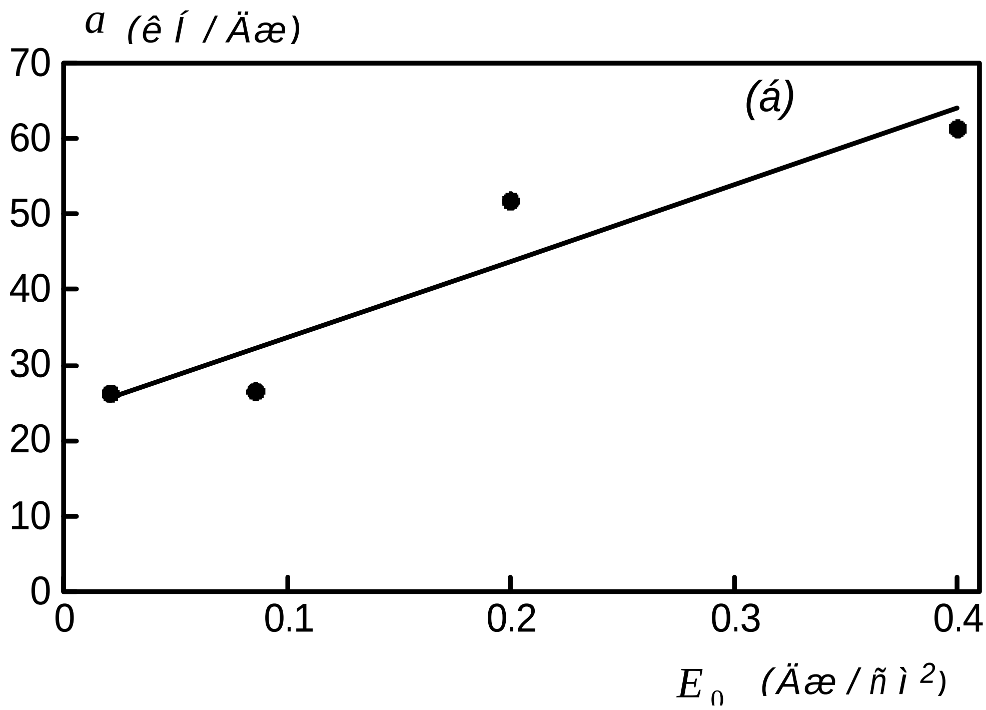


Ðèñ.6.7. Ñõåìà ýêñïåðèìåíòàëüíîé óñòàíîâêè: *1* - èìïóëüñíûé YAG:Nd-ëàçåð ($E=100$ ìÄæ, $2\tau_L=12$ íñ); *2* - íåéòðàëüíûå ñâåòîôèëüòðû; *3* - êðåìíèåâûé ôîòîäèîä; *4* - îïòîàêóñòè÷åñêàÿ ÿ÷åéêà ñ ðòóòüþ; *5* - øèðîêîïîëîñíûé îïòîàêóñòè÷åñêèé ïðèåìíèê ØÀÏÐ-04; *6* - öèôðîâîé îñöèëëîãðàô Ñ9-6; *7* - êîìïüþòåð.

Èçëó÷åíèå YAG:Nd - ëàçåðà ñ ìîäóëÿöèåé äîáðîòíîñòè ($E=100$ ìÄæ, ýôôåêòèâíàÿ äëèòåëüíîñòü èìïóëüñà (ñì. ôîðìóëó (6.11)) $\tau_L=6$ íñ) îñëàáëÿëîñü íåéòðàëüíûìè ñâåòîôèëüòðàìè è íàïðàâëÿëîñü â îïòîàêóñòè÷åñêóþ ÿ÷åéêó. ×àñòü èçëó÷åíèÿ ñ ïîìîùüþ äåëèòåëüíîé ïëàñòèíêè îòâîäèëàñü íà ñõåìó ðåãèñòðàöèè ôîðìû ëàçåðíîãî èìïóëüñà è ñèíõðîíèçàöèè. Ðàñïðåäåëåíèå ýíåðãèè â ñå÷åíèè ïó÷êà èìåëî ãàóññîâñêèé âèä, äèàìåòð ïó÷êà ñîñòàâëÿë 2.0 ± 0.1 ìì ïî óðîâíþ $1/e$. Ðòóòü ïîìåùàëàñü â îïòîàêóñòè÷åñêóþ ÿ÷åéêó è îáëó÷àëàñü ÷åðåç âõîäíîå îêíî, èçãîòîâëåííîå èç ñòåêëà K-8. Ðòóòü íàõîäèëàñü â àêóñòè÷åñêîì êîíòàêòå ñ âõîäíûì îêíîì è ïðèåìíîé ïîâåðõíîñòüþ øèðîêîïîëîñíîãî àêóñòè÷åñêîãî ïðèåìíèêà òèïà ØÀÏÐ-04 (ñì.[154]), èìåþùåãî ïðàêòè÷åñêè ðàâíîìåðíóþ õàðàêòåðèñòèêó ÷óâñòâèòåëüíîñòè â ïîëîñå 1-100 ÌÃö. Ýëåêòðè÷åñêèé ñèãíàë ðåãèñòðèðîâàëñÿ ñ ïîìîùüþ öèôðîâîãî îñöèëëîãðàôà Ñ9-6, èìåþùåãî ïîëîñó ïðîïóñêàíèÿ 100 Ìãö. Ýòî îáåñïå÷èâàëî íàáëþäåíèå àêóñòè÷åñêèõ ñèãíàëîâ ñ ðàçðåøåíèåì íå õóæå 3.5 íñ.

Àêóñòè÷åñêèå èìïóëüñû, íîðìèðîâàííûå íà âåëè÷èíó ïëîòíîñòè ïàäàþùåé ýíåðãèè, ïðèâåäåíû íà ðèñ.6.8 äëÿ ðàçëè÷íûõ åå çíà÷åíèé.





Ðèñ.6.8. Àêóñòè÷åñêèå èìïóëüñû (îòêëèê r), çàðåãèñòðèðîâàííûå ïðè âîçäåéñòâèè íà ïîâåðõíîñòü ðòóòè ëàçåðíûõ èìïóëüñîâ ñ $E_0 =$ 0.4 (*1*), 0.2 (*2*), 0.86 (*3*) è 0.021 Äæ/ñì^2 (*4*) (ñèãíàëû íîðìèðîâàíû íà ñîîòâåòñòâóþùóþ ýíåðãèþ ëàçåðíîãî èìïóëüñà) (*a*), à òàêæå ýêñïåðèìåíòàëüíàÿ (òî÷êè) è ðàñ÷åòíàÿ (ïðÿìàÿ) çàâèñèìîñòü îò E_0 àìïëèòóäû àêóñòè÷åñêèõ èìïóëüñîâ a (íîðìèðîâàííàÿ íà ëàçåðíóþ ýíåðãèþ) (*á*). Æèðíîé ëèíèåé ïîêàçàíà âðåìåííàÿ îãèáàþùàÿ ëàçåðíîãî èìïóëüñà (E_0 = 0.021 Äæ/ñì^2).

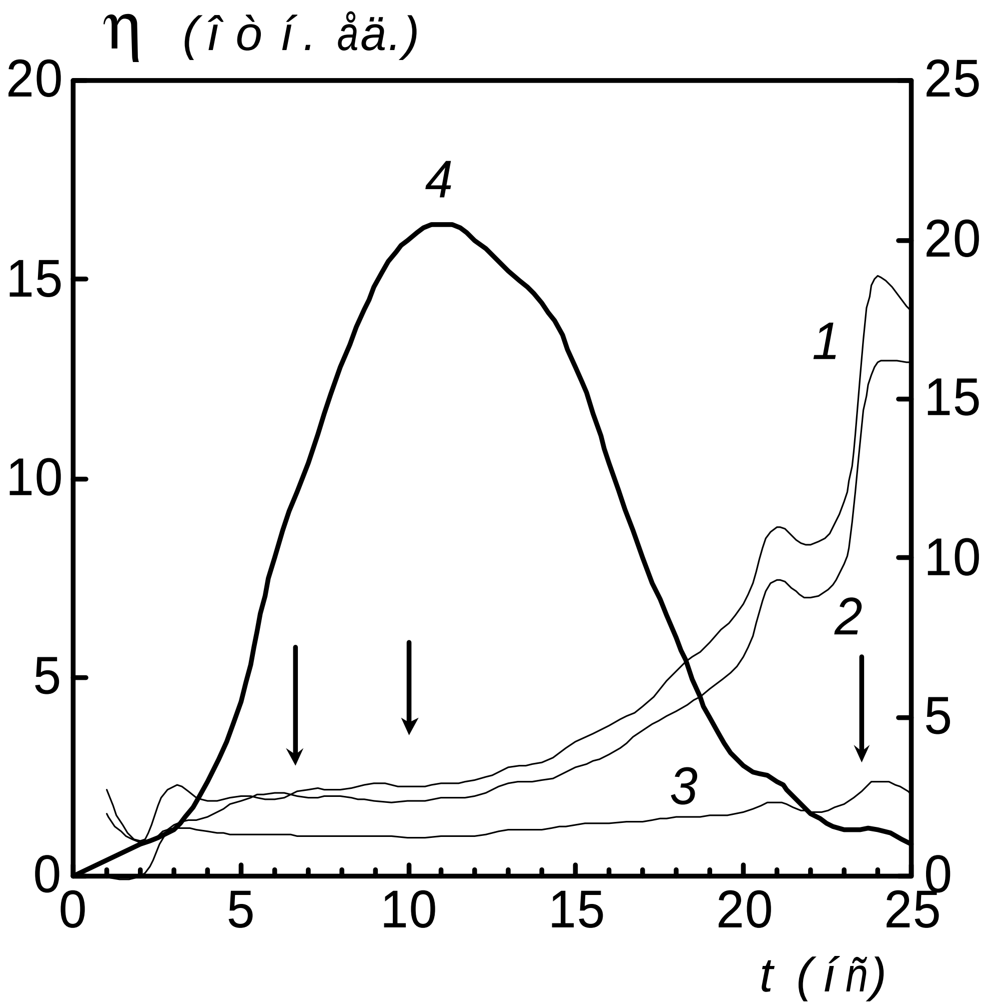
Â îòñóòñòâèå òåïëîâîé íåëèíåéíîñòè è ôàçîâûõ ïåðåõîäîâ ôîðìû ýòèõ êðèâûõ äîëæíû áûëè áû ñîâïàäàòü è ïîâòîðÿòü ôîðìó ëàçåðíîãî èìïóëüñà (íà ðèñ.6.8 èçîáðàæåíà æèðíîé ëèíèåé). Âèäíî, ÷òî ïðè ìàëîì óðîâíå ýíåðãèè ($E_0 = 21$ ìÄæ/ñì^2) ôîðìà îïòîàêóñòè÷åñêîãî ñèãíàëà äîñòàòî÷íî õîðîøî ñëåäóåò ôîðìå ëàçåðíîãî èìïóëüñà. Íåáîëüøîå ðàçëè÷èå ñâÿçàíî ñ íåêîòîðîé íåðàâíîìåðíîñòüþ ÷óâñòâèòåëüíîñòè àêóñòè÷åñêîãî ïðèåìíèêà.

Îäíàêî ïðè $E_0 = 86$ ìÄæ/ñì^2 ôîðìà àêóñòè÷åñêîãî ñèãíàëà ïðåòåðïåâàåò èçìåíåíèå. Ýòî ïðîÿâëÿåòñÿ â óâåëè÷åíèè äàâëåíèÿ ê êîíöó ëàçåðíîãî èìïóëüñà. “Ïðîëîíãèðîâàíèå” àêóñòè÷åñêîãî äàâëåíèÿ çà îêîí÷àíèå äåéñòâèÿ ëàçåðíîãî èìïóëüñà ($t > 30$ íñ) ãîâîðèò î ïîÿâëåíèè êèïåíèÿ - ïåðåãðåâ ïîâåðõíîñòè âûøå òî÷êè êèïåíèÿ (ñì. îöåíêè âûøå) - è ïîÿâëåíèè ïàðîâîãî ñëîÿ ó ïîâåðõíîñòè. Ïðè áîëüøèõ ïëîòíîñòÿõ ýíåðãèè ýòîò ïðîöåññ âûðàæåí åùå îò÷åòëèâåå è, êðîìå òîãî, ïîâûøàåòñÿ ýôôåêòèâíîñòü âîçáóæäåíèÿ çâóêà äàæå äî ìîìåíòà íà÷àëà êèïåíèÿ. Ýòî ìîæåò áûòü ñâÿçàíî ñ óìåíüøåíèåì êîýôôèöèåíòà îòðàæåíèÿ ñâåòà ïðè íàãðåâå ïîâåðõíîñòè (òåïëîâàÿ íåëèíåéíîñòü â ìåòàëëàõ íàáëþäàëàñü ðàíåå â ôîòîòåïëîâûõ ýêñïåðèìåíòàõ[155]).

Ñîâìåñòíîå äåéñòâèå òåïëîâîé íåëèíåéíîñòè è êèïåíèÿ ïðèâîäèò ê ïîñòîÿííîìó ðîñòó âî âðåìåíè ýôôåêòèâíîñòè âîçáóæäåíèÿ àêóñòè÷åñêîãî ñèãíàëà. Ýòîò ïðîöåññ ìîæíî õàðàêòåðèçîâàòü îòíîñèòåëüíîé ýôôåêòèâíîñòüþ âîçáóæäåíèÿ, òî åñòü îòíîøåíèåì ýôôåêòèâíîñòè âîçáóæäåíèÿ çâóêà ïðè äàííîé ïëîòíîñòè ýíåðãèè (è â äàííûé ìîìåíò âðåìåíè) ê ýôôåêòèâíîñòè ïðè ìàëûõ ïëîòíîñòÿõ ýíåðãèè, êîãäà òåïëîâàÿ íåëèíåéíîñòü è êèïåíèå åùå íå ïðîÿâëÿþòñÿ:

$$\eta = \frac{p'\left(t, E_0\right) \big/ E_0}{p'\left(t, E_0^{lin}\right) \big/ E_0^{lin}}, \tag{6.14}$$

ãäå $E_0^{lin} = 21$ ìÄæ/ñì^2 - ïëîòíîñòü ýíåðãèè, ïðè êîòîðîé íåëèíåéíûå ýôôåêòû åùå íå ïðîÿâëÿþòñÿ. Êðèâûå îòíîñèòåëüíîé ýôôåêòèâíîñòè âîçáóæäåíèÿ çâóêà ïðèâåäåíû íà ðèñ.6.9.



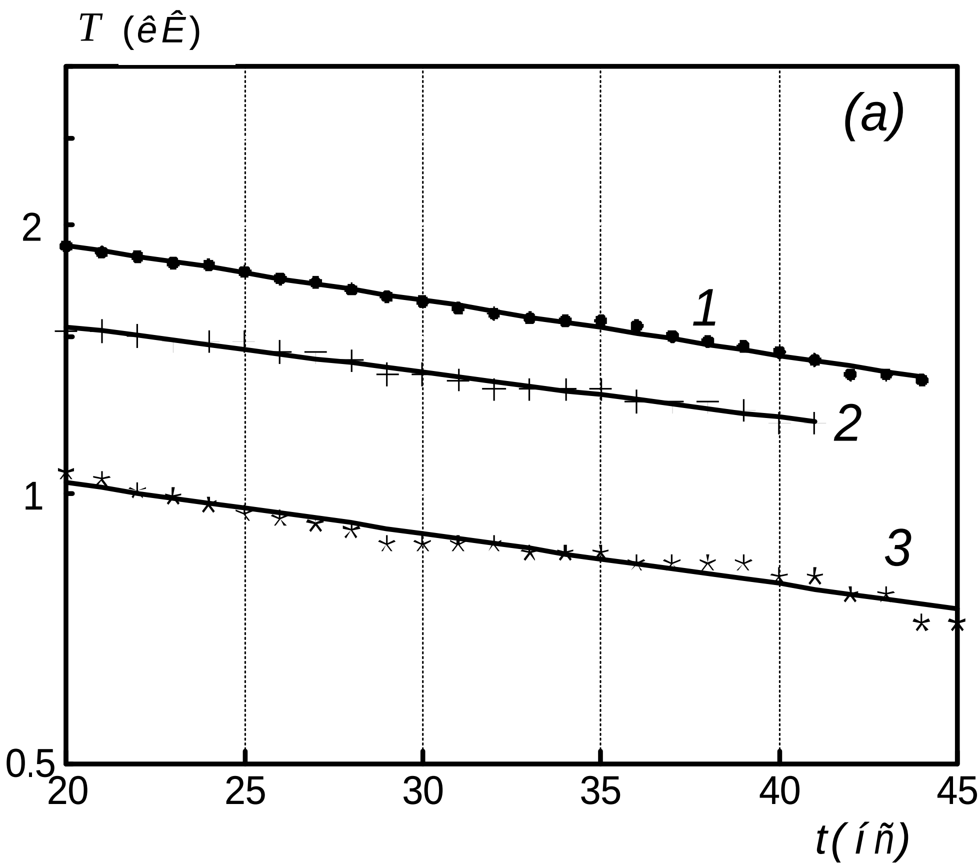
Ðèñ.6.9. Ýêñïåðèìåíòàëüíûå çàâèñèìîñòè ýôôåêòèâíîñòè âîçáóæäåíèÿ çâóêà â íåëèíåéíîì ðåæèìå îò âðåìåíè, ïîëó÷åííûå íîðìèðîâàíèåì àêóñòè÷åñêèõ ñèãíàëîâ íà ñèãíàë, èçìåðåííûé â óñëîâèÿõ ëèíåéíîãî àêóñòè÷åñêîãî îòêëèêà (ïðè $E_0 =$ 0.021 Äæ/ñì^2), äëÿ $E_0 =$ 0.4 (*1*), 0.2 (*2*), è 0.86 Äæ/ñì^2 (*3*), à òàêæå îãèáàþùàÿ ëàçåðíîãî èìïóëüñà (*4*). Ñòðåëêàìè ïîêàçàíû ðàñ÷åòíûå ìîìåíòû âðåìåíè ïðåâûøåíèÿ ïîðîãà êèïåíèÿ.

Ñòðåëêàìè îòìå÷åíû ìîìåíòû íà÷àëà êèïåíèÿ, ðàññ÷èòàííûå ïî ôîðìóëå (6.6), äëÿ ñîîòâåòñòâóþùèõ ïëîòíîñòåé ïàäàþùåé ýíåðãèè èçëó÷åíèÿ (ñì. ðèñ.6.6). Âèäíî, ÷òî îíè õîðîøî ñîîòâåòñòâóþò ìîìåíòó óâåëè÷åíèÿ ýôôåêòèâíîñòè ãåíåðàöèè çâóêà.

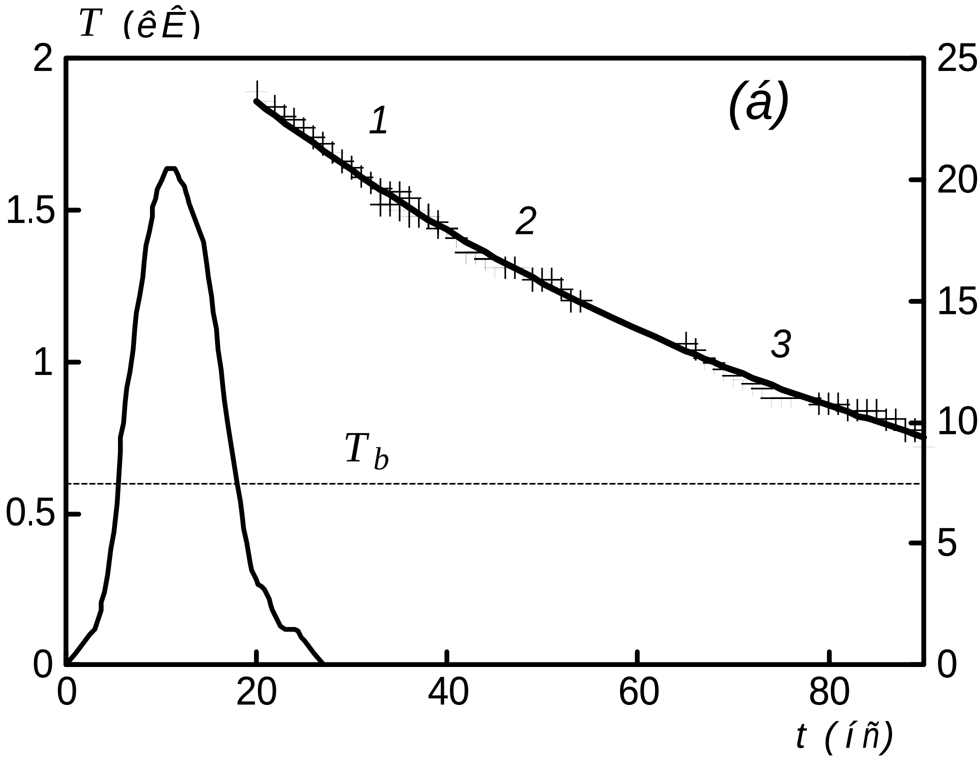
Ïî ìåðå óâåëè÷åíèÿ ïëîòíîñòè ýíåðãèè ëàçåðíîãî èçëó÷åíèÿ, ìîìåíò íà÷àëà êèïåíèÿ ñäâèãàåòñÿ ê íà÷àëó ëàçåðíîãî èìïóëüñà (ñì. ðèñ.6.6). Òåì íå ìåíåå äëÿ èññëåäóåìîãî äèàïàçîíà ïëîòíîñòåé ýíåðãèè ðàäèêàëüíûé ðîñò ýôôåêòèâíîñòè ãåíåðàöèè çâóêà èìååò ìåñòî ê êîíöó äåéñòâèÿ ëàçåðíîãî èìïóëüñà ($t>15$ íñ) (ñì. ðèñ.6.9). Ïî ýòîé ïðè÷èíå â óêàçàííîì äèàïàçîíå ýíåðãèé ðîñò àìïëèòóäû àêóñòè÷åñêîãî ñèãíàëà ñâÿçàí íå ñ ïðîÿâëåíèåì êèïåíèÿ, à òîëüêî ñ ïðîÿâëåíèåì òåïëîâîé íåëèíåéíîñòè. Íà ðèñ.6.8á ïðåäñòàâëåíà çàâèñèìîñòü ìàêñèìàëüíîé ýôôåêòèâíîñòè ãåíåðàöèè çâóêà îò ïëîòíîñòè ïàäàþùåé ýíåðãèè. Ïðÿìàÿ ëèíèÿ îòðàæàåò ðîñò ýôôåêòèâíîñòè, ñâÿçàííûé ñ óìåíüøåíèåì êîýôôèöèåíòà îòðàæåíèÿ ñâåòà â ñîîòâåòñòâèè ñ ôîðìóëàìè (6.9) è (6.10). Âèäíî, ÷òî ýêñïåðèìåíòàëüíûå òî÷êè õîðîøî ëîæàòñÿ íà ðàñ÷åòíóþ çàâèñèìîñòü, ïîëó÷åííóþ äàæå ïðè òàêèõ ãðóáûõ ïðåäïîëîæåíèÿõ.

Êàê óæå óêàçûâàëîñü âûøå, ïîñëå íà÷àëà êèïåíèÿ äàâëåíèå â àêóñòè÷åñêîé âîëíå îïðåäåëÿåòñÿ äàâëåíèåì íàñûùåííûõ ïàðîâ ðòóòè, îáðàçóþùèõñÿ íà ãðàíèöå ñòåêëî-ðòóòü. Ïîñêîëüêó çà âðåìÿ íàáëþäåíèÿ (äåñÿòêè íàíîñåêóíä) ïàðîâîé ïóçûðåê íå óñïåâàåò ñôîðìèðîâàòüñÿ, òî ôàêòè÷åñêè ó ãðàíèöû èìååò ìåñòî ïåðåãðåòûé ñëîé (òèïà êíóäñåíîâñêîãî) ïàð-æèäêîñòü. Äàâëåíèå íàñûùåííûõ ïàðîâ ñîîòâåòñòâóåò òåìïåðàòóðå ïîâåðõíîñòè ðòóòè, ïîñëåäíÿÿ ìîæåò áûòü íàéäåíà ïî ôîðìå àêóñòè÷åñêèõ èìïóëüñîâ ñ èñïîëüçîâàíèåì ôîðìóëû (6.5).

Íà ðèñ.6.10à èçîáðàæåíû çàâèñèìîñòè òåìïåðàòóðû ïîâåðõíîñòè îò âðåìåíè äëÿ òðåõ çíà÷åíèé ïëîòíîñòè ýíåðãèè èìïóëüñîâ â ïîëóëîãàðèôìè÷åñêèõ êîîðäèíàòàõ.



Âî âñåõ òðåõ ñëó÷àÿõ òåìïåðàòóðà óáûâàåò ñî âðåìåíåì ïî ýêñïîíåíöèàëüíîìó çàêîíó è âðåìÿ óáûâàíèÿ $\tau_{rel} = 77 \pm 8$ íñ íå çàâèñèò îò ýíåðãèè ëàçåðíîãî èìïóëüñà. Ýòî ïîçâîëÿåò ñäåëàòü âûâîä î òîì, ÷òî äàííàÿ çàâèñèìîñòü èìååò îáùèé õàðàêòåð, ñîîòâåòñòâóþùèé îäíîìó è òîìó æå ïðîöåññó ðåëàêñàöèè ñèñòåìû, è âñå òðè êðèâûå ìîãóò áûòü ñâåäåíû â îäíó (ñ ñîîòâåòñòâóþùèì ñäâèãîì âî âðåìåíè). Íà ðèñ.6.10á ïðåäñòàâëåí ðåçóëüòàò òàêîãî ñîâìåùåíèÿ.



Âèäíî, ÷òî òåìïåðàòóðà ïîâåðõíîñòè óáûâàåò áûñòðåå, ÷åì ïðè îáû÷íîé äèôôóçèè òåïëà (ñì. ôîðìóëó (6.4)), íî âñå åùå ïðåâûøàåò òåìïåðàòóðó êèïåíèÿ $T_b = 630^\circ K$, à çíà÷èò, ðòóòü ïîñëå îêîí÷àíèÿ äåéñòâèÿ ëàçåðíîãî èìïóëüñà íåêîòîðîå âðåìÿ (ïîðÿäêà 100 íñ) îñòàåòñÿ â ïåðåãðåòîì ñîñòîÿíèè. Ñëåäîâàòåëüíî, ïî êðàéíåé ìåðå ïðè ïëîòíîñòè ýíåðãèè ëàçåðíîãî èìïóëüñà $E_0 > 86$ ìÄæ/ñì^2 ðåàëèçóåòñÿ “çàáðîñ” ñèñòåìû â îáëàñòü ìåòàñòàáèëüíîãî ñîñòîÿíèÿ ñ ïîñëåäóþùåé ýêñïîíåíöèàëüíîé ðåëàêñàöèåé òåìïåðàòóðû ê ðàâíîâåñíîìó çíà÷åíèþ, ñîîòâåòñòâóþùåìó äèôôóçèîííîìó ìåõàíèçìó îñòûâàíèÿ ïîâåðõíîñòíîãî ñëîÿ.

Ïðîâåäåííûå îöåíêè è ýêñïåðèìåíòàëüíûå èññëåäîâàíèÿ ïîêàçûâàþò âûñîêóþ ýôôåêòèâíîñòü îïòîàêóñòè÷åñêîãî ìåòîäà ïðè èññëåäîâàíèè ìåòàñòàáèëüíûõ ñîñòîÿíèé âåùåñòâà. Âûÿâëåííûå çàêîíîìåðíîñòè äèíàìèêè ïàðîæèäêîñòíîé ñèñòåìû ìîãóò ñëóæèòü îñíîâîé äëÿ âûáîðà åå òåîðåòè÷åñêîé ìîäåëè. Ïîëó÷åííûå ðåçóëüòàòû, êðîìå òîãî, ìîãóò îêàçàòüñÿ ïîëåçíûìè ïðè ðàçðàáîòêå è èñïîëüçîâàíèè èìïóëüñíûõ ëàçåðíûõ òåõíîëîãèé.