

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й А к а д е м и и Н а у к

В.В. Русанов, В.П. Силаков, А.В. Чеботарев

**Кинетические характеристики процесса нагрева
молекулярного азота, протекающего во время
неравновесного электрического разряда
и в после разрядный период.**

Москва 2004 г.

Русанов В.В., Силаков В.П., Чеботарев А.В. Кинетические характеристики процесса нагрева молекулярного азота, протекающего во время неравновесного электрического разряда и в после разрядный период.

Аннотация.

В рамках разработанного подхода к вычислению кинетических характеристик нагрева молекулярного азота в неравновесных электрических разрядах, проведен анализ эффективности различных механизмов нагрева газа в разрядный, и в после разрядный период времени. Показано, что в диапазоне параметров $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} > 8 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ и $S > 1$ существенное влияние на динамику релаксации колебательной энергии газа оказывают процессы быстрого тушения электронно-возбужденных термов молекул азота.

Rusanov V.V, Silakov V.P. and Chebotarev A.V. Kinetic characteristics of heat process in molecular nitrogen during a non-equilibrium electrical discharge and in relaxation phase.

Abstract.

Within the framework of the developed approach to an evaluation of kinetic characteristics of heat of molecular nitrogen in non-equilibrium electrical discharges, the analysis of effectiveness of various mechanisms of heat of gas in discharge and relaxation phase is carried out. It is shown, that in a range of parameters $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} > 8 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ and $S > 1$, the processes of fast quenching of electronic-excited terms of nitrogen molecules have essential influence to dynamics of a vibrational relaxation.

Кинетические характеристики процесса нагрева молекулярного азота, протекающего во время неравновесного электрического разряда и в после разрядный период.

Русанов В.В, Силаков В.П., Чеботарев А.В.

Введение

Интенсивное развитие физики неравновесных разрядных явлений показало, что корректное описание поведения сильно возбужденных газов должно учитывать их релаксационное движение, связанное с высвобождением в тепло энергии из внутренних степеней свободы частиц газа. Теоретическое рассмотрение данного класса задач требует выполнения огромного объема вычислительных работ, в частности, связанных с детальным расчетом кинетических характеристик процесса нагрева газа.

В данной работе описана простая и достаточно надежная модель для расчета динамики нагрева молекулярного азота в неравновесном электрическом разряде и в после разрядный период.

Разработанный алгоритм решения задачи отличается высокой степенью оптимизации по скорости вычислений и предназначен для решения пространственно неоднородных задач на многопроцессорных ЭВМ.

Общая структура кинетической схемы.

Кинетическая схема, используемая для описания неравновесного электрического разряда в молекулярном азоте, при условии значительного вложения энергии во внутренние степени свободы молекул, включает в себя набор реакций между следующими компонентами плазмы:

1) Колебательные уровни основного электронного терма молекулы N_2 :

$$N_2(X^1\Sigma_g^+, v) \quad (v = 0, \dots, 47)$$

2) Электронно-возбужденные молекулы азота:

$$N_2(A^3\Sigma_u^+, v = 0-3), \quad N_2(A^3\Sigma_u^+, v = 4-7);$$

$$N_2(B^3\Pi_g) + N_2(W^3\Delta_u) + N_2(B'^3\Sigma_u^-);$$

$$N_2(a'^1\Sigma_u^-) + N_2(a^1\Pi_g) + N_2(w^1\Delta_u);$$

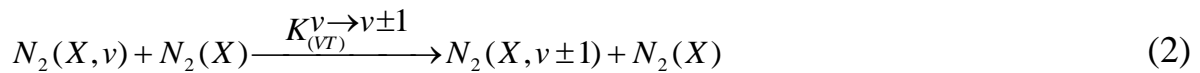
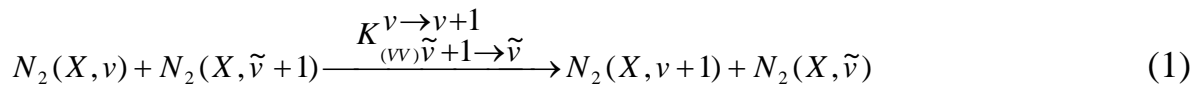
$$N_2(C^3\Pi_u).$$

Согласно имеющимся экспериментальным данным ^[1], остальные термы молекулы N_2 являются сильно преддиссоциированными. Как видно из записи, некоторые близко расположенные термы, между которыми происходит интенсивное столкновительное перемешивание, объединены в группы.

3) Электроны: e.

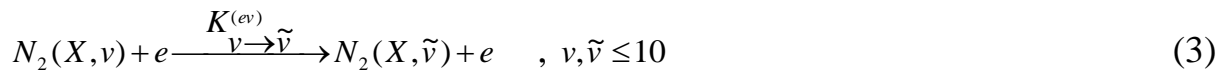
Колебательная кинетика

Колебательная кинетика молекул азота в основном электронном состоянии $N_2(X^1\Sigma_g^+, v) \equiv N_2(X, v)$ (где v - колебательное квантовое число) описывается в рамках модели поуровневой кинетики *ангармонических* осцилляторов, учитывающей колебательно-колебательные (VV) и колебательно-поступательные (VT) процессы, в приближении одноквантовых переходов ^[2]:



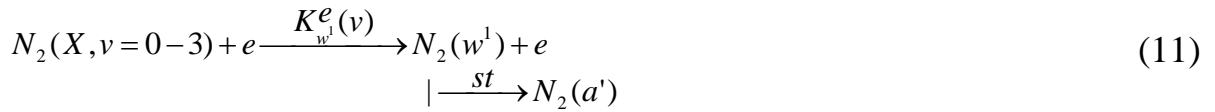
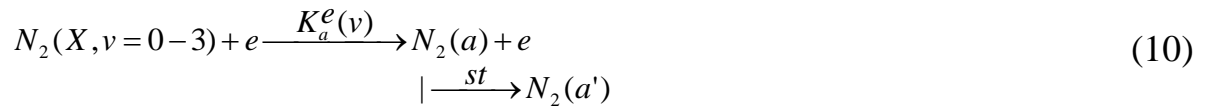
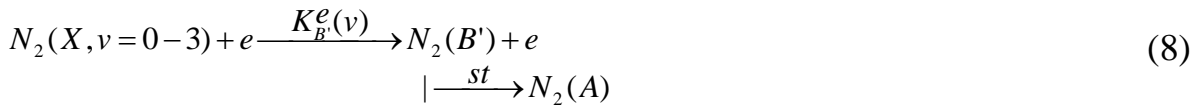
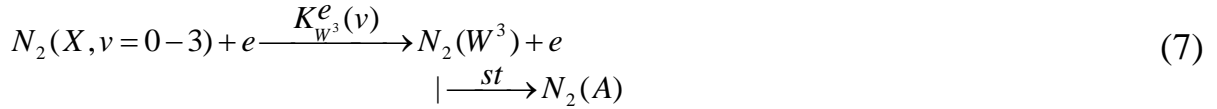
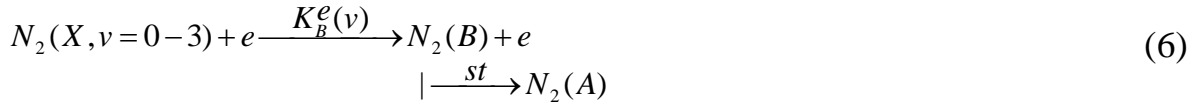
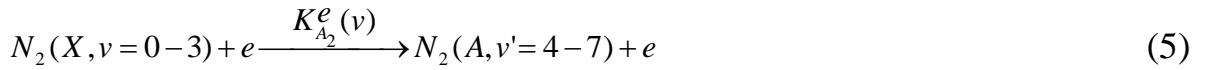
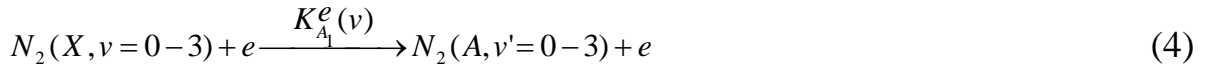
здесь $N_2(X)$ - молекула азота $N_2(X, v)$ в произвольном колебательном состоянии v . В рассматриваемой модели учитываются 48 колебательных энергетических уровней ($v = 0, \dots, v^* = 47$) молекулы азота.

При описании возбуждения и девозбуждения колебательных уровней молекулы N_2 электронным ударом учитываются перекрестные переходы между первыми 11 колебательными состояниями ^[3]:



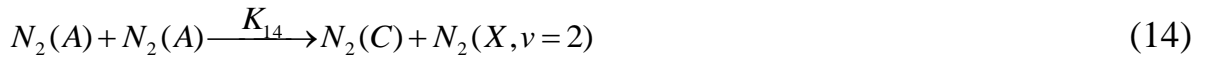
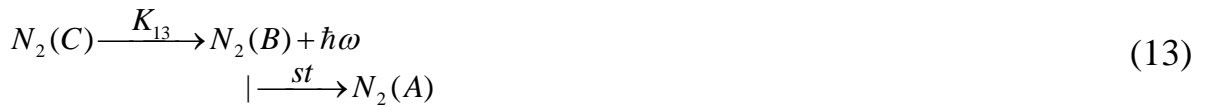
Кинетика электронных состояний молекулы азота

В настоящей работе при описании кинетики электронных состояний молекул N_2 основное внимание уделялось детальному рассмотрению процессов возбуждения электронных термов и тушению их тяжелыми частицами, что имеет большое значение для корректного расчета нагрева газа в разрядный период ^[3,4].



Баланс молекул в метастабильном электронно-возбужденном состоянии $N_2(A^3\Sigma_u^+)$

описывается реакциями (4-5), (6-8) и:



Баланс молекул в $N_2(a^1\Sigma_u^-)$ метастабильном состоянии регулируется реакциями (9-

11), (15-16) и:





Динамика функции распределения молекул азота по колебательным уровням

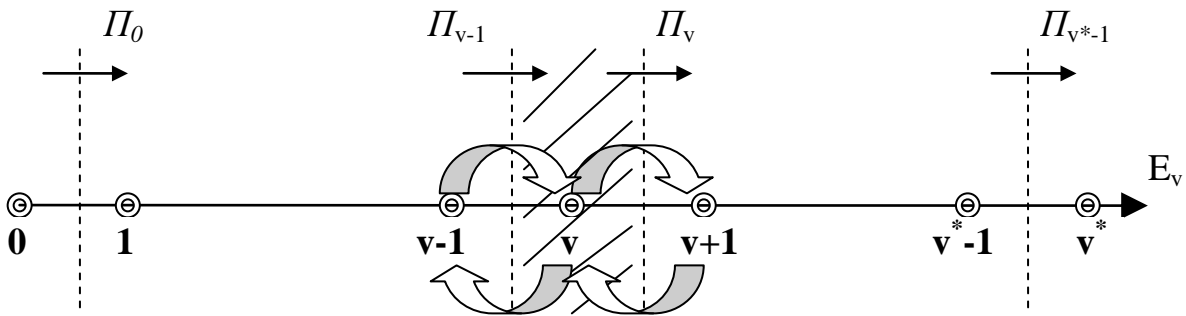
Функция распределения молекул азота по колебательным уровням основного электронного состояния формируется за счет неупругих столкновений молекулы $N_2(X, v)$ с электронами и другими молекулами N_2 . Скорость изменения концентрации молекул в v -ом колебательном состоянии определяется протеканием процессов нерезонансного VV обмена (1), VT -релаксации (2), неупругих столкновений с электронами (ev – процессы (3)), а также процессами возбуждения электронных термов молекулы из $X^1\Sigma_g^+, v$ состояния (Φ_v).

Обозначив концентрацию z -ой компоненты плазмы прописной буквой n_z , система уравнений, описывающая колебательную кинетику молекул азота, записывается в виде:

$$\frac{dn_{N_2(X,v)}}{dt} = \left(\frac{\partial n_{N_2(X,v)}}{\partial t} \right)^{(VV)} + \left(\frac{\partial n_{N_2(X,v)}}{\partial t} \right)^{(VT)} + \left(\frac{\partial n_{N_2(X,v)}}{\partial t} \right)^{(ev)} - \Phi_v, \quad v=0, \dots, v^* \quad (21)$$

$$\text{где } \left(\frac{\partial n_{N_2(X,v)}}{\partial t} \right)^{(VT)} = -(\Pi_v^{(VT)} - \Pi_{v-1}^{(VT)}), \quad \left(\frac{\partial n_{N_2(X,v)}}{\partial t} \right)^{(VV)} = -(\Pi_v^{(VV)} - \Pi_{v-1}^{(VV)}),$$

здесь $\Pi_v^{(VT)}$ и $\Pi_v^{(VV)}$ – потоки молекул вдоль оси колебательных квантовых чисел, вызванные VT - и VV - процессами (реакции 2 и 1 соответственно):



$$\Pi_v^{(VT)} = n_{N_2} \left(K_{(VT)}^{v \rightarrow v+1} n_{N_2(X,v)} - K_{(VT)}^{v+1 \rightarrow v} n_{N_2(X,v+1)} \right),$$

$$\Pi_v^{(VV)} = n_{N_2(X,v)} \sum_{i=1}^{v^*} K_{(VV),i \rightarrow i-1}^{v \rightarrow v+1} n_{N_2(X,i)} - n_{N_2(X,v+1)} \sum_{i=0}^{v^*-1} K_{(VV),v \rightarrow v-1}^{i \rightarrow i+1} n_{N_2(X,i)},$$

$$v = 0, \dots, v^* - 1, \quad n_{N_2} = \sum_{i=0}^{v^*} n_{N_2(X,v)}, \quad \Pi_{v^*}^{(VT)} = \Pi_{v^*}^{(VT)} = 0.$$

$$\left(\frac{\partial n_{N_2(X,v)}}{\partial t} \right)^{(ev)} = \begin{cases} F(v)_+^{(ev)} - F(v)_-^{(ev)}, & v = 0, \dots, 10 \\ 0, & v > 10 \end{cases}.$$

Здесь выражения $F(v)_+^{(ev)}$ и $F(v)_-^{(ev)}$ описывают заселение и расселение колебательных состояний молекулы N_2 ударом электрона:

$$F(v)_+^{(ev)} = n_e \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq v}}^{10} K_{i \rightarrow v}^{(ev)} n_{N_2(X,i)} \quad \text{и} \quad F(v)_-^{(ev)} = n_e n_{N_2(X,v)} \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq v}}^{10} K_{v \rightarrow i}^{(ev)}.$$

Источниковый член Φ_v в (21) может быть представлен в виде:

$$\Phi_v = \begin{cases} n_e n_{N_2(X,v)} \sum_z K_z^e(v) - \tilde{\Phi}_v, & v = 0, \dots, 3 \\ 0, & v > 3 \end{cases},$$

где символ z соответствует электронным состояниям: $A, B, W^3, B', a', a, w^1, C$, и

$$\tilde{\Phi}_v = \begin{cases} K_{14} n_{N_2(A)}^2, & v = 2 \\ 0, & v \neq 2 \end{cases}.$$

Динамика заселения метастабильных электронных-возбужденных термов молекулы азота

Взаимодействие молекул азота с энергичными электронами приводит к образованию многочисленных электронно-колебательных состояний молекулы азота. Большинство образующихся уровней имеют очень малое время жизни благодаря быстропротекающим процессам девозбуждения их молекулами, находящимися в основном электронном состоянии. Процессы тушения осуществляют быстрый переход электронно-возбужденных молекул в относительно стабильные состояния $N_2(A^3\Sigma_u^+)$, $N_2(a^1\Sigma_u^-)$ [5]. Согласно (4) – (20) имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dn_{N_2(A)}}{dt} = n_e \left\{ \sum_{v=0}^3 n_{N_2(X,v)} \left(K(v)_{A_1}^e + K(v)_{A_2}^e + K(v)_B^e + K(v)_{W^3}^e + K(v)_{B'}^e \right) \right\} + K_{13} n_{N_2(C)} - 2K_{14} n_{N_2(A)}^2 + \\ + K_{15} n_{N_2(a)} n_{N_2} - K_{16} n_{N_2(A)} n_{N_2(a)} - K_{17} n_{N_2(A)} n_e \end{aligned} \quad (22)$$

$$\frac{dn_{N_2(a')}}{dt} = n_e \left\{ \sum_{v=0}^3 n_{N_2(X,v)} \left(K(v)_a^e + K(v)_a^e + K(v)_{w1}^e \right) \right\} + K_{18} n_{N_2(C)} n_{N_2} - K_{15} n_{N_2(a')} n_{N_2} -$$

$$- K_{16} n_{N_2(A)} n_{N_2(a')} - 2K_{19} n_{N_2(a')}^2 - K_{20} n_{N_2(a')} n_e \quad (23)$$

где $n_{N_2(C)} = \frac{1}{K_{13} + K_{18} n_{N_2}} \left(n_e \sum_{v=0}^3 K(v)_C^e n_{N_2(X,v)} + K_{14} n_{N_2(A)}^2 \right)$ - квазистационарное значение концентрации $N_2(C^3\Pi_u)$ терма.

Нагрев газа

Суммарная скорость тепловыделения в результате протекания реакций в плазме может быть представлена в виде ^[3,4]:

$$Q = Q_{e-N_2}^{(elast)} + Q_{e-N_2}^{(RT)} + Q_{(e-N_2)+N_2}^{(ET)} + Q_{N_2-N_2}^{(VV)} + Q_{N_2-N_2}^{(VT)},$$

где слагаемое $Q_{e-N_2}^{(elast)}$ обусловлено упругим рассеиванием электронов на молекулах;

$Q_{e-N_2}^{(RT)}$ - возбуждением вращательных уровней молекулы N_2 и их быстрой последующей релаксацией;

$Q_{(e-N_2)+N_2}^{(ET)}$ - процессами релаксации (тушения) электронно-

возбужденных частиц N_2 ; $Q_{N_2-N_2}^{(VV)}$ и $Q_{N_2-N_2}^{(VT)}$ - процессами нерезонансного VV-

обмена и VT- релаксации колебательно-возбужденных молекул N_2 .

$$Q_{e-N_2}^{(elast)} = n_e \left(\frac{2}{m_e} \right)^{1/2} \int_0^\infty \frac{2m_e}{m_{N_2}} n_{N_2(X)} \sigma_{N_2(X)}^{(tr)}(\varepsilon) \left(f(\varepsilon) + kT_g \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \right) \varepsilon^2 d\varepsilon,$$

где m_e и m_{N_2} - массы электрона и молекулы азота; $\sigma_{N_2(X)}^{(tr)}$ - транспортное сечение

рассеяния электрона на молекуле $N_2(X)$; $f(\varepsilon)$ - функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ); k - константа Больцмана.

$$Q_{e-N_2}^{(RT)} = 6B_{N_2(X)} n_e n_{N_2(X)} \left(\frac{2}{m_e} \right)^{1/2} \int_0^\infty \sigma_{N_2(X)}^{(rot)}(\varepsilon) \left(f(\varepsilon) + kT_g \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \right) \varepsilon d\varepsilon,$$

где $B_{N_2(X)}$ - вращательная постоянная молекулы азота; $\sigma_{N_2(X)}^{(rot)}$ - сечение возбужде-

ния вращательных уровней основного электронного состояния молекулы азота.

$$Q_{N_2-N_2}^{(VV)} = - \sum_{v=1}^* E_v \left(\frac{\partial n_{N_2(X,v)}}{\partial t} \right)^{(VV)} = \sum_{v=1}^* E_v \left(\Pi_v^{(VV)} - \Pi_{v-1}^{(VV)} \right),$$

$$Q_{N_2-N_2}^{(VT)} = - \sum_{v=1}^* E_v \left(\frac{\partial n_{N_2(X,v)}}{\partial t} \right)^{(VT)} = \sum_{v=1}^* E_v \left(\Pi_v^{(VT)} - \Pi_{v-1}^{(VT)} \right),$$

где $E_v = v \cdot (E_1 - (v-1) \cdot \Delta E)$ - энергия v -го колебательного состояния ангармонического осциллятора; E_1 - энергия первого колебательного уровня; ΔE - постоянная ангармонизма.

Согласно результатам исследований, проведенных в работах [3,4,6], дезактивация широкого спектра возбужденных электронно-колебательных уровней N_2 происходит в одиночных актах сброса небольших квантов энергии (соответствующих малым значениям параметра Мессе) в поступательные степени свободы. В результате такого тушения, скорость поступления энергии в тепло можно приближенно записать как:

$$Q_{(e-N_2)+N_2}^{(ET)} \approx n_e \cdot \left\{ \sum_{v=0}^3 n_{N_2(X,v)} \cdot \sum_{i=1}^4 (\Delta_{(Y_i,v)} - E_{(A,v^*)} + E_{(X,v)}) \cdot K(v)_{Y_i}^e \right\} +$$

$$+ n_e \cdot \sum_{v=0}^3 n_{N_2(X,v)} \left[\sum_{i=5}^7 (\Delta_{(Y_i,v)} - E_{(a',\tilde{v}=0)} + E_{(X,v)}) \cdot K(v)_{Y_i}^e + (\Delta_{(C,v)} - E_{(a',\tilde{v}=0)} + E_{(X,v)}) \cdot K(v)_C^e \cdot \frac{K_{18} \cdot n_{N_2}}{K_{13} + K_{18} \cdot n_{N_2}} \right] +$$

$$+ (E_{(a',\tilde{v}=0)} - E_{(A,v^*)}) \cdot K_{15} \cdot n_{N_2} \cdot n_{N_2(a')} + \langle E_{(B,v'')} \rangle - E_{(A,v^*)} \cdot K_{13} \cdot n_{N_2(C)}.$$

Здесь первое слагаемое описывает нагрев газа за счет процессов тушения электронно-колебательно возбужденных состояний молекул, лежащих между уровнем $N_2(A, v^*)$ ($v^* = 3$) и термом $N_2(a')$. Второе слагаемое соответственно учитывает вклад термов лежащих выше уровня $N_2(a', v''=0)$. Третье слагаемое описывает процесс тушения $N_2(a')$ метастабильно возбужденными молекулами. $\Delta_{(Y_i,v)} = \sum_{v''} q_{v,v''} \cdot (E_{(Y_i,v'')} - E_{(X,v)})$; $q_{v,v''}$ - факторы Франка-Кондана для переходов $N_2(X,v) \rightarrow N_2(Y_i,v'')$; $E_{(Y_i,v'')} \equiv E_{N_2(Y_i,v'')}$ - энергия электронно-колебательного состояния $N_2(Y_i,v'')$; Y_i ($i=1, \dots, 7$) - обозначает последовательность термов, $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=4-7)$, $N_2(B^3\Pi_g)$, $N_2(W^3\Delta_u)$, $N_2(B^3\Sigma_u^-)$, $N_2(a^1\Sigma_u^-)$, $N_2(a^1\Pi_g)$, $N_2(w^1\Delta_u)$; $\langle E_{(B,v'')} \rangle$ - средняя энергия возбуждений, образующихся в результате радиационных переходов (13), $\langle E_{(B,v'')} \rangle \approx E_{(B,v''=0)}$.

В результате уравнение, описывающее изменение температуры газа T_g ,

представим в виде:

$$c \cdot n_{N_2} \frac{dT_g}{dt} = Q, \quad (24)$$

где c - теплоемкость газа, приходящаяся на одну молекулу (в случае постоянного давления $c = c_p = 3,5k$; в случае постоянного объема $c = c_v = 2,5k$).

Сечения и константы скоростей элементарных процессов

Кинетика электронной компоненты плазмы описывается квазистационарным уравнением Больцмана для функции распределения электронов по энергии, записанным в приближении двучленного разложения ^[7,8]. Вычисление констант скоростей процессов неупругих столкновений электронов с молекулами осуществляется путем свертки экспериментально (либо теоретически) полученных сечений этих процессов с ФРЭЭ.

В настоящей работе за основу принята база данных по сечениям и константам скоростей элементарных процессов, протекающих с участием электрона в азотной плазме, приведенная в ^[3].

Константы скоростей реакций колебательной кинетики (1) и (2) представлены в виде:

$$K_{(VV)\tilde{v}+1 \rightarrow \tilde{v}}^{v \rightarrow v+1} = (v+1)(\tilde{v}+1) \cdot K_{1 \rightarrow 0}^{0 \rightarrow 1} \cdot e^{\delta_{VV} \cdot |v-\tilde{v}|} \cdot \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2} e^{\delta_{VV} \cdot |v-\tilde{v}|} \right) \quad [9,10], \quad \delta_{VV} = \frac{6.85}{\sqrt{T_g}},$$

$$K_{(VV)\tilde{v} \rightarrow \tilde{v}+1}^{v+1 \rightarrow v} = K_{(VV)\tilde{v}+1 \rightarrow \tilde{v}}^{v \rightarrow v+1} \cdot \exp\left\{ \frac{2\Delta E}{T_g} (v-\tilde{v}) \right\}, \quad K_{1 \rightarrow 0}^{0 \rightarrow 1} \approx 2.87 \cdot 10^{-17} \cdot T_g^{3/2}, \quad cm^3/c \quad [11],$$

$$K_{(VT)}^{v \rightarrow v-1} = v \cdot K_{0 \rightarrow 1} \cdot e^{\delta_{VT} \cdot (v-1)} \quad [9,10], \quad K_{(VT)}^{v \rightarrow v+1} = K_{(VT)}^{v+1 \rightarrow v} \cdot \exp\left\{ -\frac{E_1 - 2\Delta E \cdot v}{T_g} \right\},$$

$$\delta_{(VT)} = \begin{cases} 2.8734 \cdot T_g^{-1/3} & , v \leq v_c \\ 6.85 \cdot T_g^{-1/2} & , v > v_c \end{cases}, \quad v_c = 81.4825 - 1.2866 \cdot T_g^{-1/2},$$

$$K_{0 \rightarrow 1} = \begin{cases} 2.16 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{T_g} \cdot e^{-147.43 \cdot T_g^{-1/3}} & , 300K \leq T_g \leq 2000K \\ 1.22 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{T_g} \cdot e^{-256.29 \cdot T_g^{-1/3}} & , 2000K \leq T_g \leq 5000K \end{cases}, \quad cm^3/c \quad [12-14].$$

$$E_1 = 3353K, \quad \Delta E = 20.6K, \quad \hbar\omega_0 = 3394K.$$

Скорость протекания процессов (13)-(16) и (18),(19) характеризуется соответствующими константами скоростей реакций:

$$K_{13} = 2.45 \cdot 10^7 c^{-1} \text{ [15]}, K_{14} = 1.6 \cdot 10^{-10} \left(\frac{300}{T_g} \right)^{2.64} cm^3 / c \text{ [16]}, K_{15} = 2 \cdot 10^{-13} cm^3 / c \text{ [17]},$$

$$K_{16} = 5 \cdot 10^{-11} cm^3 / c \text{ [18]}, K_{18} = 2 \cdot 10^{-11} cm^3 / c \text{ [1]}, K_{19} = 2 \cdot 10^{-10} cm^3 / c \text{ [18]}.$$

Численная модель

Кинетические характеристики процесса нагрева молекулярного азота, протекающего во время неравновесного электрического разряда и в после разрядный период, описываются жесткой задачей Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (21)-(24). Большая жесткая система обыкновенных дифференциальных уравнений решается с помощью специализированной программы DIFSUB с подключением высоко оптимизированного пакета программ Intel® Math Kernel Library.

При расчете констант скоростей протекания элементарных процессов с участием электронов решается уравнение Больцмана для ФРЭЭ, представляющее собой нелинейное интегро-дифференциальное уравнение второго порядка со смещенными аргументами. Как показывают расчеты, в условиях рассматриваемой задачи ФРЭЭ не является однопараметрическим распределением Максвелла и чрезвычайно сильно зависит от отношения напряженности электрического поля к концентрации молекул азота E_{eff} / n_{N_2} , а также от состояния внутренних степеней свободы молекул (в частности от степени возбуждения колебаний молекул).

В данной работе во избежание чрезмерных затрат машинного времени (чрезмерных даже для одномерных задач, описывающих динамику неравновесной среды) проводится предварительный расчет ФРЭЭ¹ и табулирование констант скоростей процессов как функций от величин E_{eff} / n_{N_2} и S (где

$$S = \frac{1}{\hbar\omega_0 \cdot n_{N_2}} \sum_{v=1}^{v^*} E_v n_{N_2(X,v)} - \text{среднее число колебательных квантов, приходящихся на}$$

¹ Методика расчета ФРЭЭ подробно описывается в работе [19].

одну молекулу). Полученные константы скоростей процессов (в широком диапазоне параметров $10^{-16} \leq E_{eff} / n_{N_2} \leq 3 \cdot 10^{-15}$, $0 \leq S \leq 5$) аппроксимировались аналитическими зависимостями вида:

$$\ln(K_Y^{(e)}(\frac{E_{eff}}{n_{N_2}}, S)) = \sum_{i=0} \sum_{j=0} \alpha_{i,j} \left(\left(10^{16} \frac{E_{eff}}{n_{N_2}} \right)^{\beta_Y} \right)^i (S^{\delta_Y} + a)^j,$$

что позволило снизить затраты машинного времени на несколько порядков величины.

При построении численного алгоритма решения задачи: константы скоростей прямых и обратных VV- и VT- процессов рассчитывались по рекуррентным соотношениям, а матрица Якоби правых частей уравнений (в программе DIFSUB) вычислялась аналитически. В этом случае, типичное время расчета (на компьютере P-IV 2,8 Gh) одного варианта задачи (накачка внутренних степеней свободы газа в разрядный период и полная релаксация колебаний молекул азота в после разрядный период времени) составляет 1 — 5 секунд.

Проведенная детальная оптимизация расчетного алгоритма дает реальные возможности применения разработанного программного продукта для решения пространственно неоднородных задач на многопроцессорных ЭВМ.

Результаты расчетов

Рассмотрим разрядные и после разрядные явления, протекающие в пространственно однородном молекулярном азоте, начальное равновесное состояние которого характеризуется температурой газа $T_g^{(0)} = 300K$ и концентрацией молекул $n_{N_2}^{(0)}$. В начальный момент времени на газ накладывается электрическое поле с длительностью импульса $\tau_{имп}$ и эффективной напряженностью E_{eff} . Уделяя основное внимание кинетическим характеристикам нагрева газа, будем полагать что концентрация электронов в плазме постоянна и равна $n_e = 4 \cdot 10^{12} cm^{-3}$ - типичному значению этой величины для микроволновых разрядов.

На рисунках 1 — 6 показана связь эволюции функции распределения молекул азота по колебательным состояниям с динамикой нагрева газа. Расчет проводился для изохорического процесса при $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 10^{-15} \text{ B} \cdot \text{cm}^2$ и $\tau_{umh} = 15.6$ мкс. За время τ_{umh} : в колебания молекул электронами закачивается энергия, соответствующая среднему числу колебательных квантов (приходящихся

на одну молекулу) $S^* \equiv S^{pump}(t = \tau_{umh}) = 2 \left(S^{pump}(t) = \int_0^t \sum_{v=1}^{v^*} \frac{E_v}{\hbar \omega_0 \cdot n_{N_2}} \left(\frac{\partial n_{N_2(X,v)}}{\partial t} \right)^{(ev)} d\tau \right)$; газ

нагревается на $\Delta T_{ert}(t = \tau_{umh}) = 8.6$ К – за счет упругих столкновений электронов с молекулами и релаксации вращательного возбуждения молекул; на $\Delta T_{ET}(t = \tau_{umh}) = 308$ К – за счет быстрого тушения электронно-возбужденных состояний молекул; нерезонансные колебательно-колебательные обмены нагревают газ на 150.6 К; колебательно-поступательная релаксация (стимулированная ET – нагревом) успевает нагреть газ на 355 К. Здесь:

$$\Delta T_{ert}(t) = \int_0^t \left(Q_{e-N_2}^{(elast)}(\tau) + Q_{e-N_2}^{(RT)}(\tau) \right) d\tau, \quad \Delta T_{ET}(t) = \int_0^t Q_{(e-N_2)-N_2}^{(ET)}(\tau) d\tau, \quad S_{eq}(T_g) - \text{равновесное}$$

значение числа колебательных квантов, соответствующее температуре газа T_g .

При $t > \tau_{umh}$ основным механизмом нагрева газа является релаксация энергии колебаний молекул за счет VT - процессов.

В таблицах 1- 15 приведена детальная информация о кинетических характеристиках процесса нагрева молекулярного азота в неравновесном электрическом разряде при различных значениях величины $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}}$ и давления газа в изохорическом и изобарическом приближении. Параметр $\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{S_{eq}(t)}{S(t)} \right)$ характеризует

колебательную неравновесность газа.

Как показывают расчеты, динамика нагрева газа в диапазоне параметров $S^* > 1$ и $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} > 8 \cdot 10^{-16} \text{ B} \cdot \text{cm}^2$ существенно зависит от вклада в нагрев газа процессов быстрого тушения электронно-возбужденных состояний молекул азота во время разряда.

Л и т е р а т у р а

1. Словецкий Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. – М.: Наука, 1980.
2. Гордиец Б.Ф., Осипов Л.И., Шелепин Л.А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. – М.: Наука, 1980.
3. A.A. Matveyev and V.P. Silakov. Theoretical study of the role of ultraviolet radiation of the non-equilibrium plasma in the dynamics of the microwave discharge in molecular nitrogen. – *Plasma Sources Sci. Technol.* 8(1999), pp 162-178.
4. Безменов И.В., В.В. Русанов., Силоков В.П. Динамика волнового СВЧ-разряда высокого давления в молекулярном азоте. – *Труды ИОФРАН*, т. 47, 1994, с. 74-107.
5. Силаков В.П. Влияние процессов ассоциативной ионизации электронно-возбужденных метастабилей на электрическую прочность слабоионизованного молекулярного азота высокого давления. *Физика плазмы*, т. 14, в. 10 (1988), с. 1209-1213.
6. Matveev A.A., Silakov V.P. *Plasma Sources Sci. Technol.* 4(1995), pp. 606-617.
7. Александров Н.Л., Сон Э.Е. Энергетическое распределение и кинетические коэффициенты электронов в газах в электрическом поле // *Химия плазмы*. Вып. 7 / Под ред. Б.М.Смирнова. - М.: Атомиздат, 1980. С.35-75.
8. Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир, 1981.
9. Bray K. N. C. // *J. Phys. B*, 1968, v. 1, p. 705-712.
10. Гордиец Б. Ф., Осипов Л. И., Шелепин Л. А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. – М.: Наука, 1980.
11. Валянский С. И., Верещагин К. А., Вернке В., Волков А. Ю., Пашинин П. П., Смирнов В. В., Фабелинский В. И., Чаповский П. Л. // *Квантовая электроника*, 1984, т. 11, с. 1833-1836.
12. Kovacs M. A. and Mack M. E. // *Appl. Phys. Lett.*, 1972, v. 20, p. 487.
13. Kovacs M. A. // *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, v. QE-9, p. 189-203.
14. Васильев Л. А., Ершов И. В., Семенов С. С. // *ДАН СССР*, 1969, т. 186, с. 1041-1045.
15. Кузнецова Л. А., Кузьменко Н. Е., Кузяков Ю. Я., Пластинин Ю. А., Вероятности оптических переходов двухатомных молекул. – М.: Наука, 1980. 320 с.
16. Голубовский Ю.Б., Тележко В.М., Стоянов Д.Г. О возбуждении излучающих состояний C^3P_u и C^3P_u молекулы азота при парных столкновениях метастабилей $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ // *Оптика и спектроскопия*, 1990, т. 69, с. 322-327.
17. Dreyer J.W. , Perner D. *Chem. Phys.Lett.* 1972, vol. 16, N 1, pp. 169-173.
18. Brunet H. and Rocca-Serra J. Model for a glow discharge in flowing nitrogen // *J. Appl. Phys.*, 1985, v. 57, p. 1574-1581.
19. Дятко Н.А., Кочетов И.В., Напартович А.П. Функция распределения электронов по энергии в распадающейся плазме азота. *Физика плазмы*, т. 18, вып. 7, (1992), сс. 888-900.

ТАБЛИЦА 1

| Isochoric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 6 \cdot 10^{-16} B \cdot \text{см}^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$ | | | | | | | |
|--|-------|-----------------|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|--------|--|--------------------|--------------------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| $\tau_{umh}, \text{мкс}$ | | 7.64 | | | | 16.29 | | | | 24.10 | | | | 30.76 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 7.69 | | | | 25.51 | | | | 50.35 | | | | 72.03 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 1.77 | | | | 3.99 | | | | 6.39 | | | | 8.70 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | -4.27 | | | | 11.01 | | | | 76.39 | | | | 216.15 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 0.00 | | | | 0.25 | | | | 43.80 | | | | 485.51 | | | |
| $\eta\%$ | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мкс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мкс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 17.4 | 725 | 373 | 40 | 0.46 | 932 | 481 | 119 | 51.5 | 1092 | 542 | 189 | 32.59 | 1227 | 604 | 240 | |
| 90 | 19.3 | 793 | 441 | 40 | 0.67 | 1073 | 619 | 120 | 88.0 | 1299 | 734 | 203 | 39.38 | 1496 | 837 | 274 | |
| 80 | 21.1 | 856 | 503 | 41 | 0.86 | 1225 | 770 | 121 | 131.4 | 1540 | 969 | 209 | 52.29 | 1824 | 1144 | 293 | |
| 70 | 22.1 | 887 | 535 | 41 | 0.96 | 1312 | 857 | 122 | 157.2 | 1687 | 1115 | 210 | 61.51 | 2031 | 1347 | 298 | |
| 60 | 23.0 | 907 | 554 | 41 | 1.04 | 1371 | 916 | 122 | 176.5 | 1789 | 1216 | 211 | 67.83 | 2178 | 1491 | 300 | |
| 50 | 23.7 | 920 | 567 | 41 | 1.10 | 1413 | 958 | 122 | 193.3 | 1865 | 1292 | 211 | 72.56 | 2289 | 1601 | 301 | |
| 40 | 24.4 | 929 | 577 | 41 | 1.17 | 1446 | 990 | 122 | 209.4 | 1924 | 1350 | 212 | 76.62 | 2375 | 1686 | 301 | |
| 30 | 25.2 | 937 | 584 | 41 | 1.24 | 1471 | 1016 | 122 | 226.4 | 1971 | 1397 | 212 | 80.58 | 2445 | 1755 | 302 | |
| 20 | 26.1 | 943 | 590 | 41 | 1.32 | 1492 | 1036 | 122 | 246.6 | 2009 | 1435 | 212 | 84.98 | 2502 | 1812 | 302 | |
| 10 | 27.5 | 947 | 595 | 41 | 1.44 | 1509 | 1053 | 122 | 275.3 | 2041 | 1467 | 212 | 91.14 | 2550 | 1860 | 302 | |

ТАБЛИЦА 2

| Isochoric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 8 \cdot 10^{-16} B \cdot cM^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{19} cM^{-3}$ | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|----------------|-------------|-------------|-------|---|-------------|-------------|--------|---|-------------|-------------|--------|---------------|-------------|-------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| τ_{umh}, MKS | | 4.97 | | | | 10.25 | | | | 15.48 | | | | 20.16 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), K$ | | 32.35 | | | | 75.56 | | | | 126.88 | | | | 171.7 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), K$ | | 1.47 | | | | 3.69 | | | | 5.91 | | | | 8.15 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), K$ | | -4.93 | | | | 3.43 | | | | 54.83 | | | | 178.47 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), K$ | | 0.003 | | | | 0.17 | | | | 27.33 | | | | 381.68 | | | |
| $\eta\%$ | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MKC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MKC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 14.30 | 736 | 361 | 35 | 0.36 | 946 | 454 | 105 | 36.6 | 1109 | 501 | 166 | 22.0 | 1245 | 548 | 212 | |
| 90 | 16.01 | 807 | 432 | 35 | 0.54 | 1092 | 597 | 108 | 66.2 | 1323 | 698 | 183 | 27.4 | 1523 | 787 | 249 | |
| 80 | 17.55 | 874 | 498 | 35 | 0.70 | 1251 | 755 | 109 | 103.6 | 1574 | 942 | 189 | 38.3 | 1864 | 1104 | 270 | |
| 70 | 18.47 | 908 | 532 | 35 | 0.79 | 1343 | 847 | 109 | 126.1 | 1729 | 1095 | 191 | 46.2 | 2081 | 1314 | 276 | |
| 60 | 19.18 | 928 | 553 | 35 | 0.86 | 1405 | 909 | 109 | 143.1 | 1836 | 1202 | 192 | 51.5 | 2234 | 1465 | 278 | |
| 50 | 19.82 | 943 | 567 | 35 | 0.92 | 1450 | 953 | 109 | 157.9 | 1916 | 1281 | 192 | 55.4 | 2350 | 1579 | 279 | |
| 40 | 20.44 | 953 | 578 | 35 | 0.98 | 1484 | 988 | 110 | 172.0 | 1978 | 1343 | 193 | 58.7 | 2441 | 1669 | 280 | |
| 30 | 21.11 | 961 | 586 | 35 | 1.04 | 1511 | 1015 | 110 | 186.8 | 2027 | 1392 | 193 | 62.0 | 2514 | 1742 | 280 | |
| 20 | 21.91 | 968 | 592 | 35 | 1.11 | 1533 | 1037 | 110 | 203.5 | 2068 | 1432 | 193 | 65.6 | 2574 | 1801 | 280 | |
| 10 | 23.11 | 973 | 597 | 35 | 1.21 | 1551 | 1055 | 110 | 226.7 | 2102 | 1466 | 193 | 70.7 | 2624 | 1851 | 281 | |

ТАБЛИЦА 3

| Isochoric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 10 \cdot 10^{-16} B \cdot cm^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{19} cm^{-3}$ | | | | | | | |
|--|-------|-----------------|--------------------|--------------------|--------|--|--------------------|--------------------|--------|---|--------------------|--------------------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| $\tau_{umh}, \text{мкс}$ | | 3.87 | | | | 7.79 | | | | 11.76 | | | | 15.56 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 75.47 | | | | 153.26 | | | | 235.73 | | | | 308.65 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 1.98 | | | | 3.99 | | | | 6.26 | | | | 8.63 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | -5.75 | | | | -1.79 | | | | 41.91 | | | | 150.65 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 0.00 | | | | 0.26 | | | | 30.63 | | | | 354.93 | | | |
| $\eta\%$ | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мкс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мкс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мкс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 10.52 | 753 | 338 | 26 | 246.2 | 966 | 409 | 87 | 26.1 | 1131 | 439 | 137 | 16.62 | 1270 | 472 | 175 | |
| 90 | 11.93 | 829 | 415 | 26 | 397.4 | 1120 | 559 | 90 | 48.4 | 1356 | 642 | 157 | 20.67 | 1561 | 717 | 215 | |
| 80 | 13.19 | 902 | 487 | 26 | 531.4 | 1290 | 727 | 92 | 78.9 | 1621 | 899 | 165 | 29.35 | 1920 | 1047 | 240 | |
| 70 | 13.93 | 939 | 525 | 26 | 606.5 | 1389 | 826 | 92 | 97.8 | 1785 | 1061 | 167 | 35.66 | 2149 | 1268 | 247 | |
| 60 | 14.50 | 963 | 548 | 26 | 662.5 | 1456 | 893 | 92 | 112.2 | 1900 | 1174 | 168 | 39.69 | 2312 | 1428 | 249 | |
| 50 | 15.01 | 979 | 564 | 26 | 710.9 | 1505 | 942 | 92 | 124.6 | 1985 | 1259 | 168 | 42.71 | 2434 | 1549 | 251 | |
| 40 | 15.51 | 991 | 576 | 26 | 757.3 | 1542 | 979 | 92 | 136.3 | 2051 | 1325 | 169 | 45.33 | 2531 | 1645 | 251 | |
| 30 | 16.04 | 1000 | 585 | 26 | 806.3 | 1571 | 1008 | 93 | 147.6 | 2105 | 1378 | 169 | 47.87 | 2609 | 1722 | 252 | |
| 20 | 16.68 | 1007 | 592 | 26 | 864.6 | 1595 | 1032 | 93 | 160.3 | 2148 | 1421 | 169 | 50.71 | 2673 | 1786 | 252 | |
| 10 | 17.63 | 1013 | 598 | 26 | 950.5 | 1615 | 1052 | 93 | 178.0 | 2185 | 1458 | 169 | 54.67 | 2727 | 1839 | 253 | |

ТАБЛИЦА 4

| Isochoric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 6 \cdot 10^{-16} B \cdot \text{см}^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ | | | | | | | |
|--|-------|-----------------|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| $\tau_{umh}, \text{мкс}$ | | 8.01 | | | | 17.56 | | | | 28.38 | | | | 38.18 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 3.93 | | | | 16.56 | | | | 42.09 | | | | 74.55 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 1.86 | | | | 4.32 | | | | 7.71 | | | | 11.48 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | -2.16 | | | | -0.78 | | | | 13.77 | | | | 48.27 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 0.00 | | | | 0.00 | | | | 0.03 | | | | 0.60 | | | |
| $\eta\%$ | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мкс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 175.6 | 725 | 373 | 41 | 4.46 | 933 | 483 | 121 | 0.34 | 1092 | 540 | 191 | 100.0 | 1230 | 583 | 249 | |
| 90 | 195.1 | 792 | 441 | 41 | 6.60 | 1073 | 621 | 123 | 0.71 | 1298 | 732 | 206 | 166.0 | 1500 | 818 | 284 | |
| 80 | 212.9 | 855 | 503 | 42 | 8.44 | 1225 | 772 | 124 | 1.14 | 1539 | 967 | 211 | 292.5 | 1829 | 1128 | 303 | |
| 70 | 223.6 | 886 | 534 | 42 | 9.47 | 1313 | 860 | 124 | 1.40 | 1686 | 1113 | 213 | 383.0 | 2038 | 1332 | 308 | |
| 60 | 231.9 | 906 | 554 | 42 | 10.24 | 1371 | 918 | 124 | 1.60 | 1788 | 1214 | 213 | 444.8 | 2185 | 1477 | 310 | |
| 50 | 239.3 | 919 | 567 | 42 | 10.91 | 1414 | 960 | 125 | 1.77 | 1864 | 1290 | 214 | 490.9 | 2296 | 1587 | 311 | |
| 40 | 246.5 | 928 | 576 | 42 | 11.55 | 1446 | 993 | 125 | 1.93 | 1922 | 1348 | 214 | 530.6 | 2383 | 1674 | 312 | |
| 30 | 254.3 | 936 | 584 | 42 | 12.23 | 1471 | 1018 | 125 | 2.10 | 1969 | 1395 | 214 | 569.2 | 2453 | 1743 | 312 | |
| 20 | 263.7 | 941 | 589 | 42 | 13.03 | 1492 | 1039 | 125 | 2.30 | 2008 | 1433 | 214 | 612.3 | 2511 | 1800 | 312 | |
| 10 | 277.7 | 946 | 594 | 42 | 14.22 | 1509 | 1056 | 125 | 2.59 | 2040 | 1465 | 214 | 672.5 | 2559 | 1849 | 312 | |

ТАБЛИЦА 5

| Isochoric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 8 \cdot 10^{-16} B \cdot \text{см}^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ | | | | | | | |
|--|-------|-----------------|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| $\tau_{umh}, \text{мкс}$ | | 5.18 | | | | 11.04 | | | | 17.47 | | | | 23.89 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 18.01 | | | | 49.68 | | | | 93.78 | | | | 145.62 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 1.81 | | | | 3.97 | | | | 6.74 | | | | 10.01 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | -1.90 | | | | -2.08 | | | | 6.80 | | | | 33.35 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 0.00 | | | | 0.00 | | | | 0.03 | | | | 0.50 | | | |
| $\eta\%$ | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мкс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 152.3 | 733 | 364 | 37 | 3.74 | 942 | 462 | 111 | 0.28 | 1103 | 511 | 174 | 75.4 | 1243 | 546 | 224 | |
| 90 | 170.2 | 803 | 433 | 37 | 5.67 | 1086 | 604 | 113 | 0.59 | 1315 | 707 | 190 | 131.8 | 1520 | 785 | 261 | |
| 80 | 186.3 | 868 | 499 | 37 | 7.35 | 1243 | 760 | 114 | 0.98 | 1563 | 948 | 196 | 244.0 | 1858 | 1102 | 282 | |
| 70 | 195.9 | 901 | 532 | 37 | 8.29 | 1334 | 850 | 115 | 1.22 | 1715 | 1099 | 198 | 325.2 | 2073 | 1311 | 287 | |
| 60 | 203.4 | 921 | 552 | 37 | 9.00 | 1395 | 911 | 115 | 1.40 | 1821 | 1203 | 199 | 379.0 | 2225 | 1461 | 289 | |
| 50 | 210.1 | 935 | 566 | 37 | 9.60 | 1440 | 955 | 115 | 1.55 | 1899 | 1282 | 199 | 419.2 | 2340 | 1575 | 290 | |
| 40 | 216.6 | 945 | 576 | 37 | 10.19 | 1473 | 989 | 115 | 1.70 | 1960 | 1342 | 199 | 453.9 | 2430 | 1664 | 291 | |
| 30 | 223.6 | 953 | 584 | 37 | 10.80 | 1500 | 1015 | 115 | 1.85 | 2009 | 1391 | 199 | 487.6 | 2502 | 1736 | 291 | |
| 20 | 232.0 | 959 | 590 | 37 | 11.54 | 1521 | 1037 | 115 | 2.03 | 2049 | 1431 | 200 | 525.3 | 2562 | 1795 | 292 | |
| 10 | 244.6 | 964 | 595 | 37 | 12.62 | 1539 | 1055 | 115 | 2.28 | 2082 | 1464 | 200 | 577.8 | 2612 | 1845 | 292 | |

ТАБЛИЦА 6

| Isochoric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 10 \cdot 10^{-16} B \cdot cm^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{18} cm^{-3}$ | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|----------------|-------------|-------------|-------|--|-------------|-------------|-------|---|-------------|-------------|--------|-------------|-------------|-------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| τ_{umh}, MKS | | 4.06 | | | | 8.43 | | | | 13.06 | | | | 17.84 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), K$ | | 46.01 | | | | 104.28 | | | | 171.15 | | | | 244.73 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), K$ | | 2.07 | | | | 4.31 | | | | 6.97 | | | | 10.10 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), K$ | | -1.88 | | | | -3.13 | | | | 3.01 | | | | 26.05 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), K$ | | 0.00 | | | | 0.01 | | | | 0.06 | | | | 0.86 | | | |
| $\eta\%$ | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MKS | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 119.4 | 746 | 347 | 30 | 2.81 | 958 | 428 | 97 | 0.21 | 1121 | 465 | 152 | 56.8 | 1262 | 489 | 195 | |
| 90 | 134.7 | 820 | 421 | 30 | 4.46 | 1108 | 576 | 100 | 0.46 | 1340 | 665 | 170 | 101.5 | 1549 | 734 | 234 | |
| 80 | 148.4 | 890 | 491 | 30 | 5.91 | 1273 | 739 | 101 | 0.80 | 1599 | 916 | 178 | 195.4 | 1901 | 1061 | 258 | |
| 70 | 156.5 | 926 | 527 | 30 | 6.72 | 1370 | 835 | 102 | 1.00 | 1758 | 1074 | 179 | 263.8 | 2126 | 1279 | 264 | |
| 60 | 162.7 | 948 | 549 | 30 | 7.33 | 1435 | 900 | 102 | 1.16 | 1869 | 1184 | 180 | 307.7 | 2285 | 1436 | 267 | |
| 50 | 168.3 | 964 | 564 | 30 | 7.85 | 1482 | 947 | 102 | 1.29 | 1952 | 1266 | 181 | 340.7 | 2406 | 1555 | 268 | |
| 40 | 173.8 | 975 | 576 | 30 | 8.35 | 1518 | 983 | 102 | 1.42 | 2016 | 1330 | 181 | 369.2 | 2500 | 1649 | 269 | |
| 30 | 179.6 | 984 | 584 | 30 | 8.88 | 1546 | 1011 | 102 | 1.55 | 2067 | 1381 | 181 | 396.9 | 2576 | 1724 | 270 | |
| 20 | 186.6 | 990 | 591 | 30 | 9.51 | 1569 | 1034 | 102 | 1.70 | 2110 | 1423 | 181 | 427.8 | 2639 | 1787 | 270 | |
| 10 | 197.1 | 996 | 596 | 30 | 10.44 | 1588 | 1053 | 102 | 1.90 | 2145 | 1458 | 182 | 471.0 | 2691 | 1839 | 270 | |

ТАБЛИЦА 7

| Isobaric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 6 \cdot 10^{-16} B \cdot \text{см}^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$ | | | | | | | |
|--|-------|-----------------|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|-----------------|--------------------|--------------------|-----|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| $\tau_{umh}, \text{мкс}$ | | 7.59 | | | | 15.64 | | | | 21.96 | | | | 26.24 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), \text{К}$ | | 5.58 | | | | 20.19 | | | | 48.71 | | | | 98.69 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), \text{К}$ | | 1.26 | | | | 2.81 | | | | 4.49 | | | | 6.25 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), \text{К}$ | | -3.04 | | | | 6.42 | | | | 37.86 | | | | 87.15 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), \text{К}$ | | 0.00 | | | | 0.10 | | | | 6.48 | | | | 58.30 | | | |
| $\eta\%$ | t, мс | $T_g, \text{К}$ | $T_{VT}, \text{К}$ | $T_{VV}, \text{К}$ | t, мс | $T_g, \text{К}$ | $T_{VT}, \text{К}$ | $T_{VV}, \text{К}$ | t, мс | $T_g, \text{К}$ | $T_{VT}, \text{К}$ | $T_{VV}, \text{К}$ | t, мс | $T_g, \text{К}$ | $T_{VT}, \text{К}$ | $T_{VV}, \text{К}$ | |
| | 95 | 69.5 | 667 | 323 | 35 | 3.10 | 874 | 444 | 104 | 0.26 | 1035 | 506 | 168 | 0.06 | 1178 | 544 | 213 |
| 90 | 80.8 | 709 | 365 | 36 | 4.65 | 977 | 546 | 105 | 0.63 | 1196 | 661 | 174 | 0.13 | 1399 | 740 | 237 | |
| 80 | 92.7 | 741 | 397 | 36 | 6.24 | 1075 | 644 | 105 | 1.08 | 1366 | 828 | 176 | 0.29 | 1644 | 974 | 246 | |
| 70 | 100.6 | 756 | 411 | 36 | 7.26 | 1126 | 694 | 105 | 1.39 | 1459 | 920 | 177 | 0.42 | 1785 | 1113 | 248 | |
| 60 | 107.0 | 764 | 420 | 36 | 8.08 | 1157 | 725 | 105 | 1.64 | 1520 | 981 | 177 | 0.52 | 1879 | 1206 | 249 | |
| 50 | 112.9 | 769 | 425 | 36 | 8.83 | 1179 | 747 | 105 | 1.86 | 1562 | 1023 | 177 | 0.62 | 1946 | 1273 | 249 | |
| 40 | 118.7 | 773 | 429 | 36 | 9.57 | 1195 | 763 | 105 | 2.09 | 1594 | 1055 | 177 | 0.72 | 1997 | 1323 | 250 | |
| 30 | 125.1 | 776 | 431 | 36 | 10.38 | 1207 | 775 | 105 | 2.34 | 1619 | 1080 | 177 | 0.82 | 2037 | 1363 | 250 | |
| 20 | 133.0 | 778 | 433 | 36 | 11.36 | 1216 | 784 | 105 | 2.64 | 1639 | 1100 | 177 | 0.94 | 2069 | 1394 | 250 | |
| 10 | 144.7 | 779 | 435 | 36 | 12.84 | 1224 | 792 | 105 | 3.09 | 1655 | 1116 | 177 | 1.12 | 2095 | 1420 | 250 | |

ТАБЛИЦА 8

| Isobaric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 8 \cdot 10^{-16} B \cdot \text{см}^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$ | | | | | | | |
|--|-------|-----------------|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|--------|-----------------|--------------------|--------------------|-----|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| $\tau_{umh}, \text{мкс}$ | | 4.75 | | | | 9.17 | | | | 12.94 | | | | 16.13 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 26.03 | | | | 70.89 | | | | 147.02 | | | | 280.08 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 1.25 | | | | 2.68 | | | | 4.45 | | | | 6.78 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | -3.44 | | | | 0.26 | | | | 20.22 | | | | 61.18 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 0.00 | | | | 0.05 | | | | 2.25 | | | | 41.24 | | | |
| $\eta\%$ | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мкс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| | 95 | 57.6 | 680 | 316 | 31 | 2.30 | 893 | 418 | 92 | 0.16 | 1064 | 453 | 142 | 33.8 | 1225 | 445 | 166 |
| 90 | 67.5 | 724 | 360 | 31 | 3.62 | 1003 | 527 | 93 | 0.43 | 1238 | 617 | 152 | 78.9 | 1468 | 654 | 197 | |
| 80 | 77.9 | 760 | 396 | 31 | 4.97 | 1109 | 632 | 93 | 0.80 | 1422 | 798 | 154 | 189.8 | 1740 | 910 | 211 | |
| 70 | 84.7 | 776 | 412 | 31 | 5.84 | 1164 | 687 | 94 | 1.05 | 1524 | 900 | 155 | 282.5 | 1899 | 1065 | 213 | |
| 60 | 90.3 | 785 | 421 | 31 | 6.54 | 1198 | 722 | 94 | 1.25 | 1591 | 966 | 155 | 363.0 | 2005 | 1170 | 214 | |
| 50 | 95.4 | 791 | 426 | 31 | 7.18 | 1222 | 745 | 94 | 1.44 | 1638 | 1013 | 156 | 434.2 | 2082 | 1246 | 215 | |
| 40 | 100.5 | 795 | 431 | 31 | 7.81 | 1239 | 763 | 94 | 1.63 | 1674 | 1049 | 156 | 500.2 | 2140 | 1303 | 215 | |
| 30 | 106.0 | 798 | 434 | 31 | 8.50 | 1253 | 776 | 94 | 1.83 | 1702 | 1076 | 156 | 568.1 | 2185 | 1348 | 216 | |
| 20 | 112.8 | 800 | 436 | 31 | 9.33 | 1263 | 787 | 94 | 2.08 | 1724 | 1098 | 156 | 647.4 | 2222 | 1385 | 216 | |
| 10 | 123.0 | 802 | 438 | 31 | 10.59 | 1272 | 795 | 94 | 2.46 | 1742 | 1116 | 156 | 762.3 | 2252 | 1414 | 216 | |

ТАБЛИЦА 9

| Isobaric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 10 \cdot 10^{-16} B \cdot cm^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{19} cm^{-3}$ | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|----------------|-------------|-------------|-------|--|-------------|-------------|-------|---|-------------|-------------|--------|-------------|-------------|-------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| τ_{umh}, MKS | | 3.60 | | | | 6.64 | | | | 9.54 | | | | 12.74 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), K$ | | 71.26 | | | | 192.23 | | | | 417.74 | | | | 807.73 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), K$ | | 1.53 | | | | 3.39 | | | | 6.16 | | | | 10.46 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), K$ | | -3.91 | | | | -4.31 | | | | 7.02 | | | | 37.62 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), K$ | | 0.00 | | | | 0.08 | | | | 3.96 | | | | 70.03 | | | |
| $\eta\%$ | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MKS | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 39.24 | 705 | 297 | 23 | 1.16 | 937 | 351 | 68 | 0.05 | 1141 | 298 | 83 | 14.7 | 1346 | 145 | 57 | |
| 90 | 46.82 | 756 | 348 | 23 | 2.07 | 1061 | 474 | 70 | 0.17 | 1347 | 482 | 102 | 27.4 | 1650 | 383 | 101 | |
| 80 | 54.71 | 798 | 390 | 23 | 3.02 | 1186 | 598 | 70 | 0.38 | 1571 | 699 | 108 | 70.4 | 2002 | 694 | 132 | |
| 70 | 59.86 | 817 | 409 | 23 | 3.64 | 1251 | 663 | 71 | 0.53 | 1700 | 826 | 110 | 109.9 | 2211 | 894 | 138 | |
| 60 | 64.06 | 829 | 420 | 23 | 4.14 | 1293 | 705 | 71 | 0.66 | 1784 | 910 | 110 | 139.6 | 2353 | 1032 | 141 | |
| 50 | 67.90 | 836 | 428 | 23 | 4.59 | 1322 | 734 | 71 | 0.78 | 1845 | 970 | 110 | 164.7 | 2456 | 1133 | 142 | |
| 40 | 71.73 | 841 | 433 | 23 | 5.04 | 1344 | 755 | 71 | 0.90 | 1890 | 1015 | 111 | 188.3 | 2535 | 1210 | 143 | |
| 30 | 75.91 | 845 | 437 | 23 | 5.53 | 1360 | 772 | 71 | 1.03 | 1926 | 1051 | 111 | 212.8 | 2597 | 1271 | 143 | |
| 20 | 81.00 | 848 | 440 | 23 | 6.12 | 1373 | 785 | 71 | 1.19 | 1955 | 1079 | 111 | 241.4 | 2647 | 1320 | 143 | |
| 10 | 88.66 | 850 | 442 | 23 | 7.01 | 1384 | 795 | 71 | 1.43 | 1978 | 1103 | 111 | 283.1 | 2688 | 1361 | 144 | |

ТАБЛИЦА 10

| Isobaric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 6 \cdot 10^{-16} B \cdot \text{см}^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ | | | | | | | |
|--|--------|-----------------|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|-----------------|--------------------|--------------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| $\tau_{umn}, \text{мкс}$ | | 8.01 | | | | 17.05 | | | | 26.29 | | | | 34.03 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umn}), \text{K}$ | | 2.89 | | | | 12.38 | | | | 33.48 | | | | 67.15 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umn}), \text{K}$ | | 1.33 | | | | 3.04 | | | | 5.29 | | | | 7.88 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umn}), \text{K}$ | | -1.53 | | | | -0.7 | | | | 7.08 | | | | 22.66 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umn}), \text{K}$ | | 0 | | | | 0 | | | | 0.01 | | | | 0.09 | | | |
| $\eta\%$ | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 683.6 | 668 | 324 | 37 | 31.5 | 873 | 445 | 106 | 2.6 | 1031 | 511 | 171 | 0.41 | 1170 | 557 | 222 | |
| 90 | 795.5 | 710 | 366 | 37 | 47.2 | 975 | 547 | 106 | 6.4 | 1191 | 664 | 178 | 1.26 | 1387 | 751 | 246 | |
| 80 | 913.2 | 743 | 399 | 37 | 63.2 | 1073 | 644 | 107 | 11.1 | 1359 | 830 | 179 | 2.95 | 1627 | 982 | 254 | |
| 70 | 990.6 | 758 | 413 | 37 | 73.5 | 1123 | 695 | 107 | 14.2 | 1451 | 922 | 180 | 4.24 | 1765 | 1118 | 256 | |
| 60 | 1053.9 | 766 | 421 | 37 | 81.8 | 1155 | 726 | 107 | 16.7 | 1511 | 981 | 180 | 5.34 | 1857 | 1209 | 256 | |
| 50 | 1111.9 | 771 | 427 | 37 | 89.4 | 1176 | 747 | 107 | 19.1 | 1553 | 1023 | 180 | 6.35 | 1922 | 1274 | 257 | |
| 40 | 1169.8 | 775 | 431 | 37 | 96.9 | 1192 | 763 | 107 | 21.4 | 1584 | 1055 | 180 | 7.38 | 1972 | 1323 | 257 | |
| 30 | 1233.0 | 778 | 433 | 37 | 105.0 | 1204 | 775 | 107 | 23.9 | 1609 | 1079 | 181 | 8.50 | 2011 | 1362 | 257 | |
| 20 | 1310.1 | 780 | 435 | 37 | 115.0 | 1213 | 784 | 107 | 27.0 | 1628 | 1098 | 181 | 9.83 | 2042 | 1393 | 257 | |
| 10 | 1426.0 | 781 | 437 | 37 | 129.9 | 1221 | 792 | 107 | 31.6 | 1644 | 1114 | 181 | 11.76 | 2067 | 1419 | 257 | |

ТАБЛИЦА 11

| Isobaric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 8 \cdot 10^{-16} B \cdot \text{см}^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ | | | | | | | |
|--|-------|-----------------|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|-----------------|--------------------|--------------------|-----|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| $\tau_{umh}, \text{мкс}$ | | 5.07 | | | | 10.23 | | | | 15.23 | | | | 19.76 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 13.92 | | | | 41.43 | | | | 87.34 | | | | 158.08 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 1.31 | | | | 2.84 | | | | 4.83 | | | | 7.31 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | -1.29 | | | | -1.55 | | | | 2.15 | | | | 11.70 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 0.00 | | | | 0.00 | | | | 0.01 | | | | 0.07 | | | |
| $\eta\%$ | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| | 95 | 603 | 677 | 318 | 33 | 26.2 | 885 | 429 | 98 | 1.94 | 1049 | 481 | 156 | 0.30 | 1195 | 508 | 195 |
| 90 | 705 | 720 | 362 | 33 | 40.3 | 991 | 534 | 99 | 5.11 | 1217 | 640 | 164 | 0.93 | 1425 | 709 | 222 | |
| 80 | 813 | 755 | 397 | 33 | 54.8 | 1094 | 636 | 99 | 9.21 | 1393 | 814 | 166 | 2.33 | 1679 | 952 | 232 | |
| 70 | 883 | 771 | 412 | 33 | 64.2 | 1147 | 689 | 99 | 11.96 | 1491 | 911 | 167 | 3.44 | 1826 | 1097 | 234 | |
| 60 | 941 | 780 | 421 | 33 | 71.7 | 1180 | 722 | 99 | 14.22 | 1554 | 975 | 167 | 4.38 | 1924 | 1194 | 235 | |
| 50 | 994 | 785 | 427 | 33 | 78.5 | 1203 | 745 | 99 | 16.28 | 1599 | 1020 | 167 | 5.27 | 1995 | 1264 | 236 | |
| 40 | 1046 | 789 | 431 | 33 | 85.3 | 1219 | 762 | 99 | 18.35 | 1633 | 1053 | 167 | 6.14 | 2048 | 1317 | 236 | |
| 30 | 1104 | 792 | 434 | 33 | 92.7 | 1232 | 774 | 99 | 20.59 | 1659 | 1079 | 167 | 7.04 | 2090 | 1358 | 236 | |
| 20 | 1174 | 795 | 436 | 33 | 101.7 | 1242 | 784 | 99 | 23.33 | 1680 | 1100 | 167 | 8.08 | 2123 | 1392 | 236 | |
| 10 | 1280 | 796 | 438 | 33 | 115.2 | 1250 | 793 | 99 | 27.45 | 1697 | 1117 | 167 | 9.59 | 2151 | 1419 | 236 | |

ТАБЛИЦА 12

| Isobaric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 10 \cdot 10^{-16} B \cdot cm^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{18} cm^{-3}$ | | | | | | | |
|---------------------------------|--------|----------------|-------------|-------------|-------|--|-------------|-------------|-------|---|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| τ_{umh}, MKS | | 3.89 | | | | 7.51 | | | | 10.95 | | | | 14.35 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), K$ | | 39.35 | | | | 107.64 | | | | 221.85 | | | | 416.56 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), K$ | | 1.56 | | | | 3.39 | | | | 5.85 | | | | 9.30 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), K$ | | -1.19 | | | | -2.13 | | | | -0.67 | | | | 5.53 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), K$ | | 0.00 | | | | 0.00 | | | | 0.02 | | | | 0.23 | | | |
| $\eta\%$ | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 469.0 | 693 | 306 | 27 | 17.34 | 911 | 391 | 83 | 1.00 | 1092 | 401 | 123 | 0.14 | 1265 | 351 | 130 | |
| 90 | 554.7 | 741 | 354 | 28 | 28.60 | 1027 | 505 | 84 | 3.02 | 1276 | 573 | 136 | 0.44 | 1526 | 572 | 166 | |
| 80 | 644.2 | 780 | 393 | 28 | 40.28 | 1140 | 618 | 85 | 6.02 | 1474 | 767 | 139 | 1.26 | 1821 | 847 | 185 | |
| 70 | 702.8 | 798 | 411 | 28 | 47.79 | 1200 | 677 | 85 | 8.11 | 1586 | 877 | 140 | 2.00 | 1995 | 1016 | 188 | |
| 60 | 750.5 | 808 | 421 | 28 | 53.85 | 1237 | 715 | 85 | 9.83 | 1659 | 950 | 141 | 2.61 | 2112 | 1131 | 190 | |
| 50 | 794.3 | 815 | 428 | 28 | 59.36 | 1263 | 740 | 85 | 11.42 | 1711 | 1002 | 141 | 3.12 | 2196 | 1215 | 191 | |
| 40 | 838.0 | 819 | 432 | 28 | 64.85 | 1282 | 759 | 85 | 13.01 | 1750 | 1040 | 141 | 3.59 | 2260 | 1278 | 191 | |
| 30 | 885.6 | 823 | 436 | 28 | 70.80 | 1297 | 774 | 85 | 14.74 | 1780 | 1071 | 141 | 4.07 | 2311 | 1328 | 191 | |
| 20 | 943.6 | 825 | 438 | 28 | 78.04 | 1308 | 785 | 85 | 16.86 | 1804 | 1095 | 141 | 4.64 | 2351 | 1368 | 191 | |
| 10 | 1031.0 | 828 | 441 | 28 | 88.91 | 1318 | 795 | 85 | 20.05 | 1824 | 1115 | 141 | 5.46 | 2385 | 1401 | 191 | |

ТАБЛИЦА 13

| Isobaric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 6 \cdot 10^{-16} B \cdot \text{см}^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ | | | | | | | |
|--|-------|-----------------|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|--|--------------------|--------------------|-------|-----------------|--------------------|--------------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| $\tau_{umh}, \text{мкс}$ | | 8.19 | | | | 18.27 | | | | 29.64 | | | | 41.52 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 1.85 | | | | 6.92 | | | | 20.13 | | | | 47.14 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 1.36 | | | | 3.26 | | | | 5.95 | | | | 9.68 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | -0.26 | | | | -0.34 | | | | 0.79 | | | | 4.02 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), \text{K}$ | | 0.00 | | | | 0.00 | | | | 0.00 | | | | 0.00 | | | |
| $\eta\%$ | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, мс | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 7098 | 666 | 324 | 37 | 321 | 872 | 447 | 108 | 26.7 | 1029 | 516 | 175 | 4.0 | 1166 | 566 | 226 | |
| 90 | 8247 | 707 | 365 | 37 | 479 | 973 | 549 | 109 | 65.5 | 1189 | 670 | 181 | 12.8 | 1383 | 759 | 249 | |
| 80 | 9458 | 739 | 397 | 37 | 641 | 1071 | 645 | 109 | 112.9 | 1355 | 834 | 183 | 30.2 | 1620 | 988 | 257 | |
| 70 | 10254 | 754 | 411 | 37 | 746 | 1121 | 695 | 109 | 144.5 | 1447 | 925 | 184 | 43.4 | 1757 | 1123 | 259 | |
| 60 | 10905 | 762 | 419 | 37 | 829 | 1152 | 726 | 109 | 170.2 | 1506 | 984 | 184 | 54.5 | 1848 | 1213 | 260 | |
| 50 | 11502 | 767 | 424 | 37 | 906 | 1173 | 748 | 109 | 193.8 | 1548 | 1026 | 184 | 64.9 | 1913 | 1278 | 260 | |
| 40 | 12099 | 771 | 428 | 37 | 982 | 1189 | 763 | 109 | 217.3 | 1579 | 1057 | 184 | 75.4 | 1962 | 1326 | 260 | |
| 30 | 12749 | 773 | 431 | 37 | 1064 | 1201 | 775 | 109 | 242.8 | 1603 | 1082 | 184 | 86.8 | 2000 | 1365 | 260 | |
| 20 | 13542 | 775 | 433 | 37 | 1164 | 1210 | 784 | 109 | 274.0 | 1623 | 1101 | 184 | 100.6 | 2031 | 1395 | 260 | |
| 10 | 14735 | 777 | 435 | 37 | 1315 | 1218 | 792 | 109 | 320.8 | 1639 | 1117 | 184 | 120.5 | 2056 | 1421 | 260 | |

ТАБЛИЦА 14

| Isobaric process | | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 8 \cdot 10^{-16} B \cdot \text{cm}^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$ | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|----------------|-------------|-------------|-------|--|-------------|-------------|-------|--|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|--|
| | | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| τ_{umn}, MKS | | 5.22 | | | | 11.13 | | | | 17.35 | | | | 23.68 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umn}), K$ | | 8.17 | | | | 23.80 | | | | 53.54 | | | | 104.61 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umn}), K$ | | 1.34 | | | | 3.02 | | | | 5.28 | | | | 8.33 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umn}), K$ | | -0.18 | | | | -0.32 | | | | 0.15 | | | | 1.81 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umn}), K$ | | 0.00 | | | | 0.00 | | | | 0.00 | | | | 0.00 | | | |
| $\eta\%$ | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | t, MC | T_g, K | T_{VT}, K | T_{VV}, K | |
| 95 | 6298 | 674 | 321 | 35 | 275 | 882 | 437 | 103 | 21.8 | 1042 | 495 | 164 | 3.23 | 1185 | 531 | 208 | |
| 90 | 7353 | 717 | 364 | 35 | 421 | 987 | 541 | 103 | 56.0 | 1206 | 653 | 172 | 10.36 | 1409 | 730 | 234 | |
| 80 | 8461 | 751 | 398 | 35 | 570 | 1088 | 642 | 104 | 99.3 | 1379 | 823 | 174 | 25.47 | 1658 | 968 | 243 | |
| 70 | 9189 | 766 | 413 | 35 | 666 | 1140 | 694 | 104 | 128.3 | 1474 | 918 | 174 | 37.27 | 1801 | 1109 | 245 | |
| 60 | 9784 | 775 | 422 | 35 | 743 | 1173 | 727 | 104 | 152.0 | 1536 | 980 | 175 | 47.32 | 1896 | 1204 | 246 | |
| 50 | 10329 | 780 | 428 | 35 | 813 | 1195 | 749 | 104 | 173.7 | 1580 | 1023 | 175 | 56.70 | 1965 | 1272 | 247 | |
| 40 | 10874 | 784 | 432 | 35 | 883 | 1212 | 765 | 104 | 195.3 | 1613 | 1056 | 175 | 66.15 | 2017 | 1323 | 247 | |
| 30 | 11467 | 787 | 435 | 35 | 959 | 1224 | 778 | 104 | 218.9 | 1638 | 1081 | 175 | 76.03 | 2057 | 1363 | 247 | |
| 20 | 12191 | 790 | 437 | 35 | 1051 | 1234 | 788 | 104 | 247.7 | 1658 | 1101 | 175 | 87.55 | 2090 | 1396 | 247 | |
| 10 | 13281 | 791 | 439 | 35 | 1190 | 1242 | 796 | 104 | 290.9 | 1675 | 1118 | 175 | 104.2 | 2116 | 1423 | 247 | |

ТАБЛИЦА 15

| Isobaric process | $T_g^0 = 300K$ | | | | $E_{eff} / n_{N_2^{(0)}} = 10 \cdot 10^{-16} B \cdot \text{см}^2$ | | | | $n_{N_2^{(0)}} = 2.5 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ | | | | | | | |
|--|----------------|-----------------|--------------------|--------------------|---|-----------------|--------------------|--------------------|--|-----------------|--------------------|--------------------|---------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| | $S^* = 0.5$ | | | | $S^* = 1.0$ | | | | $S^* = 1.5$ | | | | $S^* = 2.0$ | | | |
| $\tau_{umh}, \text{мкс}$ | 4.03 | | | | 8.19 | | | | 12.44 | | | | 16.69 | | | |
| $\Delta T_{ET}(\tau_{umh}), \text{К}$ | 23.15 | | | | 69.28 | | | | 134.15 | | | | 254.29 | | | |
| $\Delta T_{ert}(\tau_{umh}), \text{К}$ | 1.56 | | | | 3.44 | | | | 5.98 | | | | 9.45 | | | |
| $\Delta T_{VV}(\tau_{umh}), \text{К}$ | -0.015 | | | | -0.33 | | | | -0.15 | | | | 0.82 | | | |
| $\Delta T_{VT}(\tau_{umh}), \text{К}$ | 0 | | | | 0 | | | | 0 | | | | 0,005 | | | |
| $\eta\%$ | t, мс | $T_g, \text{К}$ | $T_{VT}, \text{К}$ | $T_{VV}, \text{К}$ | t, мс | $T_g, \text{К}$ | $T_{VT}, \text{К}$ | $T_{VV}, \text{К}$ | t, мс | $T_g, \text{К}$ | $T_{VT}, \text{К}$ | $T_{VV}, \text{К}$ | t, мс | $T_g, \text{К}$ | $T_{VT}, \text{К}$ | $T_{VV}, \text{К}$ |
| 95 | 5231 | 686 | 312 | 30 | 211.74 | 899 | 410 | 91 | 13.90 | 1070 | 443 | 142 | 1,953 | 1229 | 431 | 164 |
| 90 | 6156 | 732 | 359 | 30 | 337.46 | 1010 | 520 | 92 | 39.44 | 1246 | 608 | 152 | 6,313 | 1473 | 642 | 196 |
| 80 | 7124 | 769 | 396 | 30 | 467.10 | 1118 | 628 | 93 | 74.62 | 1432 | 792 | 155 | 17,14 | 1747 | 901 | 210 |
| 70 | 7759 | 786 | 412 | 30 | 550.33 | 1174 | 684 | 93 | 98.66 | 1537 | 896 | 155 | 26,26 | 1907 | 1057 | 213 |
| 60 | 8277 | 796 | 422 | 30 | 617.49 | 1209 | 719 | 93 | 118.40 | 1605 | 963 | 156 | 34,17 | 2014 | 1163 | 214 |
| 50 | 8751 | 802 | 428 | 30 | 678.58 | 1234 | 744 | 93 | 136.52 | 1653 | 1012 | 156 | 41,11 | 2091 | 1239 | 214 |
| 40 | 9225 | 806 | 433 | 30 | 739.32 | 1252 | 762 | 93 | 154.65 | 1689 | 1048 | 156 | 47,54 | 2149 | 1297 | 215 |
| 30 | 9741 | 809 | 436 | 30 | 805.26 | 1265 | 775 | 93 | 174.40 | 1718 | 1076 | 156 | 54,16 | 2194 | 1342 | 215 |
| 20 | 10371 | 812 | 438 | 30 | 885.47 | 1276 | 786 | 93 | 198.51 | 1740 | 1098 | 156 | 61,88 | 2232 | 1379 | 215 |
| 10 | 11318 | 814 | 440 | 30 | 1005.8 | 1285 | 795 | 93 | 234.79 | 1759 | 1116 | 156 | 73,09 | 2262 | 1409 | 215 |

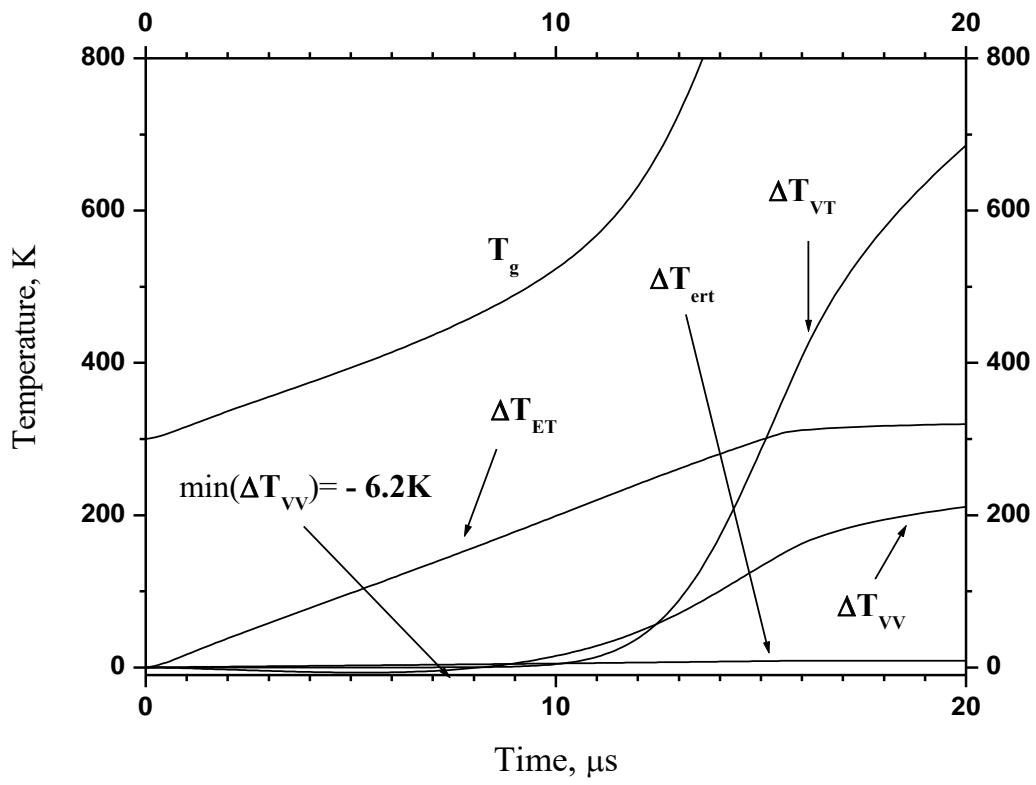


Рис. 1

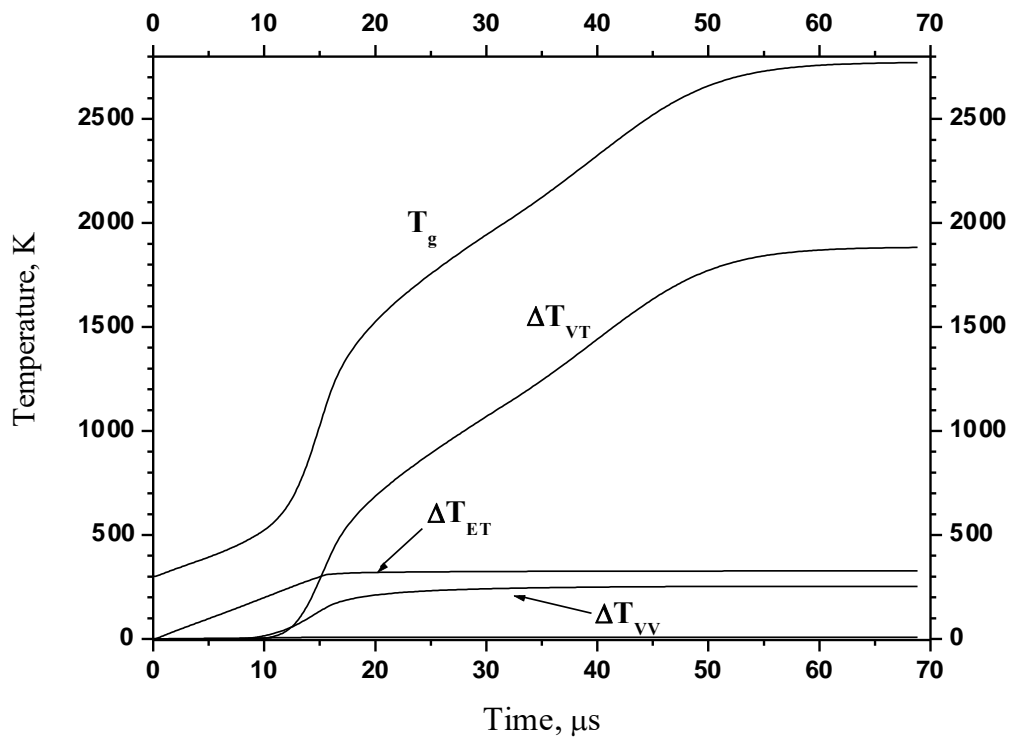


Рис. 2

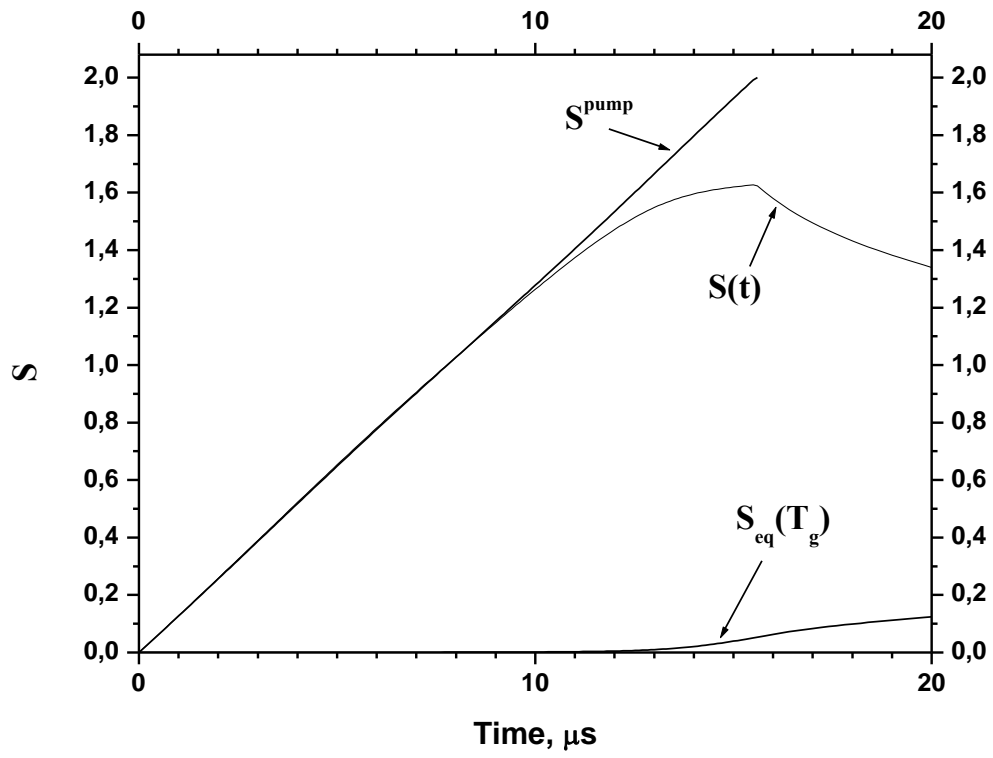


Рис. 3

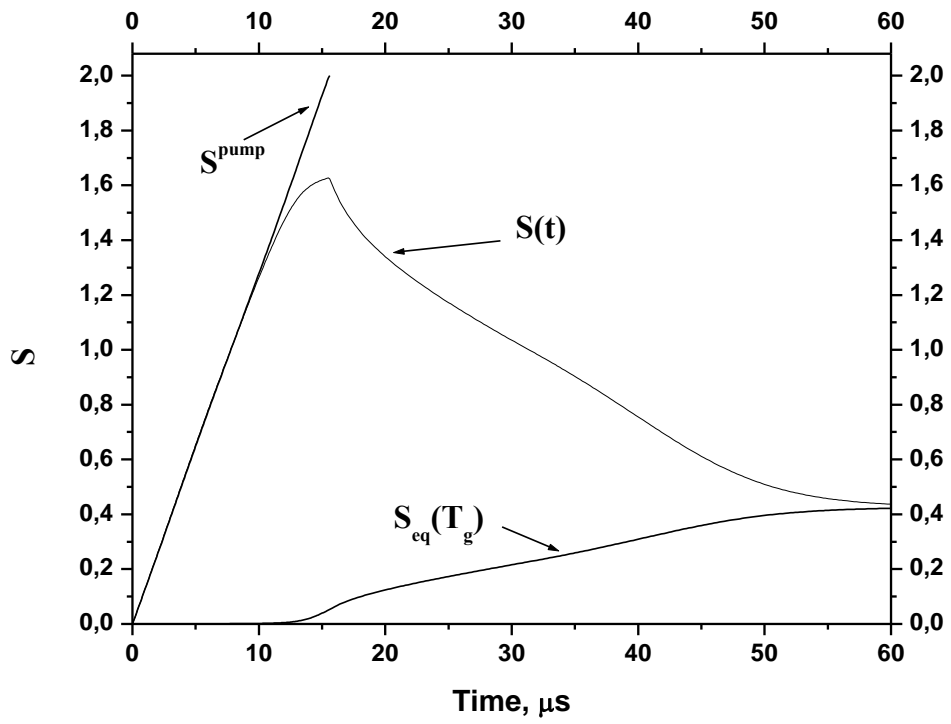


Рис. 4

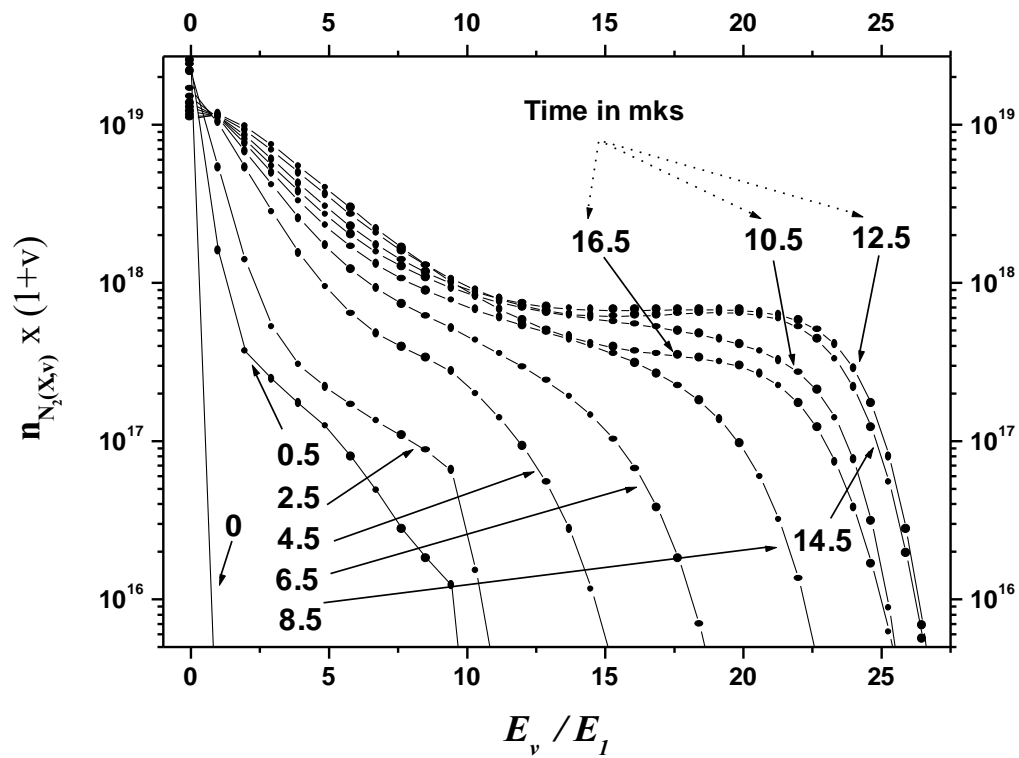


Рис. 5

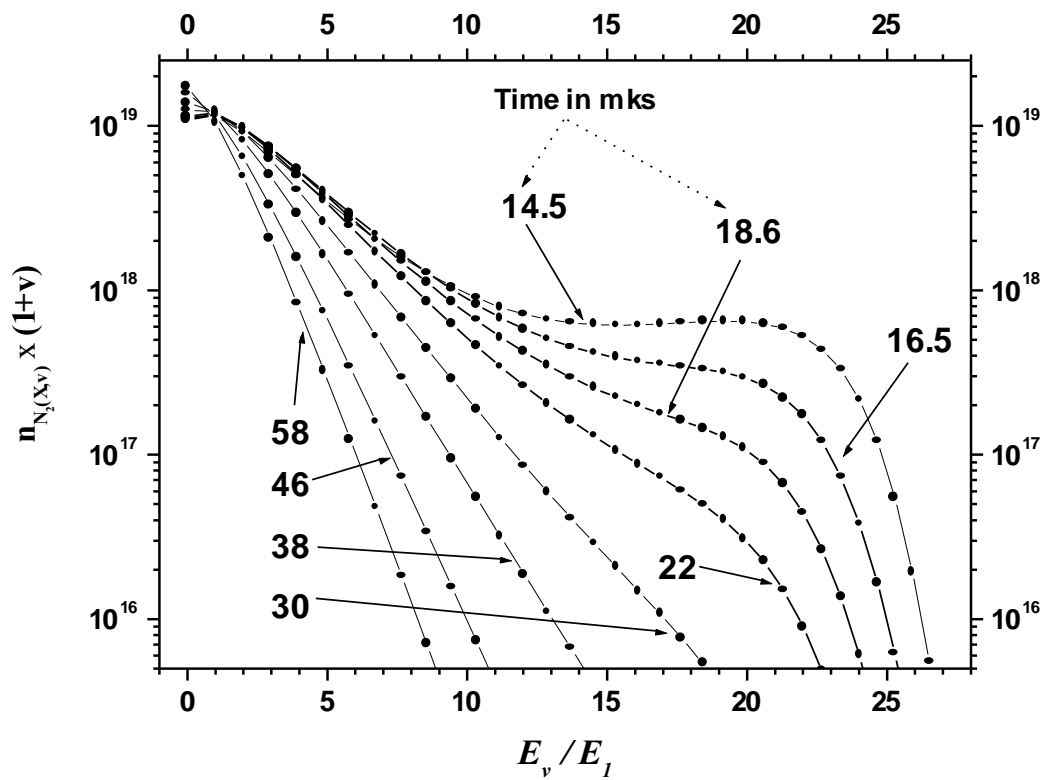


Рис. 6