

УДК 621.373.826

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ МОЛЕКУЛ АЗОТА ПО СЕЧЕНИЮ РАЗРЯДНОГО КАНАЛА N₂-ЛАЗЕРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Б. А. Козлов, д.ф.-м.н., профессор кафедры ПЭл РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-5957-3688, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

З. В. Швеиц, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0006-7259-337X, e-mail: zlatashvetsv@gmail.com

Аналитическими методами получены распределения температуры и концентрации молекул азота по сечению разрядного канала в азотном лазере низкого давления с накачкой в продольном разряде в импульсно-периодическом режиме ($F = 200 - 2000$ Гц, энергия накачки $W = 0,5$ Дж). При максимальной средней мощности накачки $P = 1$ кВт температура по центру разрядного канала достигает 3000 °С, а концентрация молекул азота в центре разрядного канала уменьшается в $1,4$ раза по сравнению с концентрацией молекул у стенок. Полученная информация полезна для установления механизма пробоя в импульсно-периодическом режиме и взаимосвязи распределения мощности лазерного излучения по сечению пучка с процессами в разрядном канале.

Ключевые слова: азотный лазер низкого давления, разрядный канал, перенос тепла, распределение температуры и концентрации молекул по сечению разрядного канала, средняя мощность накачки.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-189-195

Введение

Импульсно-периодические азотные лазеры низкого давления являются незаменимым технологическим инструментом в микро- и наноэлектронике [1, 2]. Сложная структура излучения в поперечном сечении лазерного пучка (центральное пятно и окружающий его «ореол») затрудняет фокусировку такого излучения в пятно с минимальными геометрическими размерами и не дает получить необходимые качественные показатели обрабатываемых изделий. По мере увеличения частоты повторения импульсов и средней мощности накачки наблюдается снижение мощности лазерного излучения в «ореоле» [3, 4]. Такая динамика распределения мощности излучения по сечению пучка может быть связана с перераспределением плотности тока по сечению разрядного канала при увеличении уровня накачки.

Для определения механизма изменения плотности мощности лазерного излучения по сечению лазерного пучка в импульсно-периодическом режиме и последующего управления оптическими параметрами азотного лазера необходимо обладать информацией об условиях пробоя как по газовой среде в центральной части разрядного канала, так и по поверхности его стенок. Газоразрядные процессы в этих условиях будут в значительной степени определяться температурными полями и распределениями плотности молекул азота в пределах разрядного канала.

Многочисленные исследования газоразрядных и оптических параметров импульсных разрядов в среде молекулярного азота с целью выяснения механизмов пробоя длинных трубок и особенностей генерации лазерного излучения проводились при относительно низких давлениях ($P_{N_2} \sim 1$ Торр) и на частотах повторения импульсов в единицы герц [5-7], которые не типичны для промышленных вариантов азотных лазеров ($P_{N_2} \sim 15 - 25$ Торр и $F_{\text{повт}} = 50 - 1500$ Гц). Информация об условиях пробоя и генерации лазерного излучения на

длине волны $\lambda = 337$ нм при возбуждении на частотах повторения импульсов в сотни герц и килогерц до настоящего времени отсутствует.

Экспериментальное определение температурных полей и соответствующих им распределений концентраций молекул азота по сечению разрядного канала диаметром 4 мм является чрезвычайно сложной задачей. Поэтому изучение распределений температуры и концентрации молекул азота проводилось аналитическим методом.

Целью работы является получение количественной информации о распределениях температуры и концентрации молекул азота по сечению разрядного канала в диапазоне частот повторения возбуждающих импульсов от 200 до 2000 Гц с последующим установлением механизма пробоя в длинных трубках, а также генерации лазерного излучения в импульсно-периодическом режиме без характерного «ореола».

Разрядный канал и теоретическая модель

Разрядный канал, в котором зажигался продольный разряд и осуществлялось возбуждение молекул азота, был изготовлен из бериллиевой керамики. Его длина составляла 350 мм, внутренний диаметр ($2r_0$) – 4 мм, а внешний – 8 мм. Разрядная трубка располагалась внутри стеклянной оболочки. Через зазор между разрядной трубкой и внешней оболочкой подавалась вода. Сечение разрядной трубки и внешней оболочки теплообменника схематически приведено на рисунке 1.

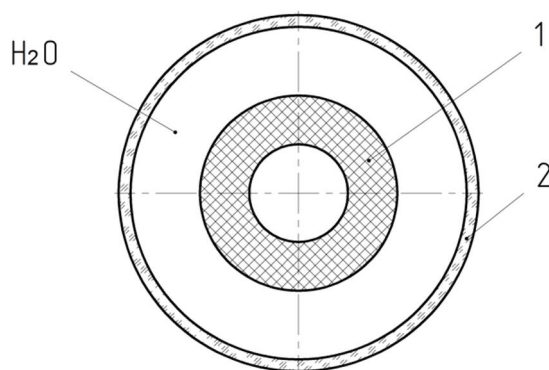


Рисунок 1 – Газоразрядная трубка (1) и внешняя оболочка теплообменника (2)
Figure 1 – Gas discharge tube (1) and outer shell of heat exchanger (2)

Зазор между керамической трубкой (1) и внешней оболочкой теплообменника (2) был 6 мм. Проточная вода подавалась в цилиндрический теплообменник с расходом 2 – 3 л/мин.

Тепло, выделяющееся в разрядном канале диаметром 4 мм и длиной 350 мм, передавалось через цилиндрическую оболочку в проточную воду. Учитывая очень высокую теплопроводность бериллиевой керамики и малую толщину стенки, принималось, что радиальный перепад температур по толщине стенки отсутствовал. В этом случае можно считать, что джоулево тепло, выделяющееся при накачке лазера, передается в водяную рубашку и удаляется из активного элемента лазера. Температуру на внутренней стороне разрядного канала в первом приближении можно считать равной температуре проточной воды в теплообменнике.

Средняя электрическая мощность, рассеиваемая в газовом разряде и идущая полностью на нагрев газа, определяется как:

$$P_{\text{эл}} = W_{\text{н}} F_{\text{повт}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{н}}$ – энергия накачки; $F_{\text{повт}}$ – частота повторения импульсов.

Так, для энергии накачки в 0,5 Дж и возбуждения разряда на частотах повторения импульсов 200 Гц и 2 кГц средняя электрическая (она же и тепловая) мощность будет иметь значение 100 Вт и 1000 Вт.

На рисунке 2 показаны характерные значения мощностей в рабочем диапазоне частот при различных зарядных напряжениях.

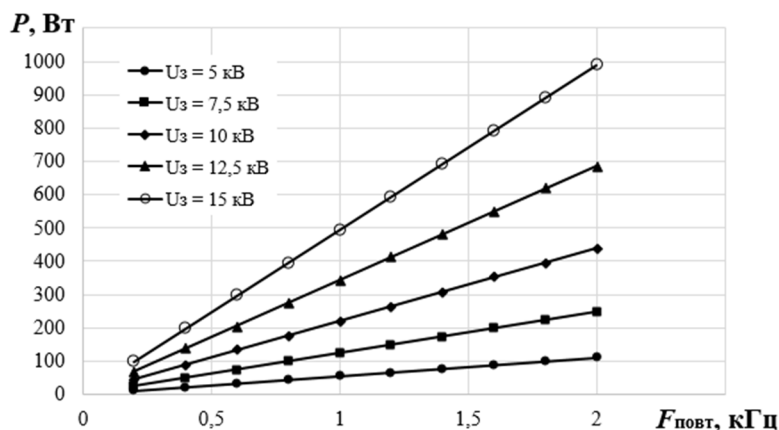


Рисунок 2 – Значения мощности, вводимой в канал, при различной частоте повторения импульсов и зарядных напряжениях

Figure 2 – Values of power input into channel at different pulse repetition rates and charging voltages

Расчет температуры газа можно провести на основе баланса средних мощностей, поступающих в разрядный канал и отводимых из него за счет теплопроводности в водяную рубашку охлаждения с проточной водой.

Стационарное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах (r , θ , z) при независимости граничных условий от « z » и « θ » (осевой и угловой координат) имеет вид [9]:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \lambda(T) \frac{dT}{dr} = -q_v, \quad (2)$$

где r – радиальная координата, см; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К); T – температура; q_v – плотность мощности тепловыделения, Вт/см³.

Граничные условия:

$$\frac{dT}{dr} = 0 \text{ при } r = 0 \text{ (условие симметрии);}$$

$$T = T_{\text{ст}} \text{ при } r = R \text{ (на стенке разрядного канала } R \text{ температура равна температуре стенки } T_{\text{ст}}).$$

В этом случае тепловой поток перпендикулярен к оси « z » цилиндрического канала азотного лазера. При значительных уровнях мощности в сотни и тысячи ватт, вводимых в разрядную трубку активного элемента объемом $V \approx 4,4 \text{ см}^3$, необходимо учитывать функциональную зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.

Для описания $\lambda(T)$ можно использовать функцию Сезерланда [10]:

$$\lambda(T) = \lambda_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}, \quad (3)$$

где λ_0 – значение коэффициента теплопроводности при $T = 273 \text{ К}$, Вт/(см·К); C – постоянная Сезерланда (114 К для азота).

Подстановка формулы (3) в уравнение (2) приводит к некоторым сложностям при решении дифференциального уравнения:

$$\frac{d}{dr} \left(r \lambda_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \frac{dT}{dr} \right) dr = -q_v r dr.$$

После первого интегрирования:

$$r \lambda_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \frac{dT}{dr} = -q_v \frac{r^2}{2} + A.$$

Используя граничное условие $dT/dr = 0$ при $r = 0$, находим постоянную интегрирования $A = 0$. Тогда можно записать:

$$\int \left(\frac{T^{3/2}}{T + C} \right) dT = - \int q_v \frac{273^{3/2}}{2\lambda_0 (273 + C)} r dr. \quad (4)$$

Интегрирование правой части выражения (4) по T приводит к неявному виду уравнения $T(r)$, решение которого требует использования численных методов.

Для решения в аналитическом виде необходимо упростить функцию зависимости коэффициента теплопроводности от температуры. Используя замену $\lambda(T)$ на аппроксимацию по таблице данных, можно вместо функции Сезерланда использовать более простую и удобную для расчетов степенную функцию (рисунок 3).

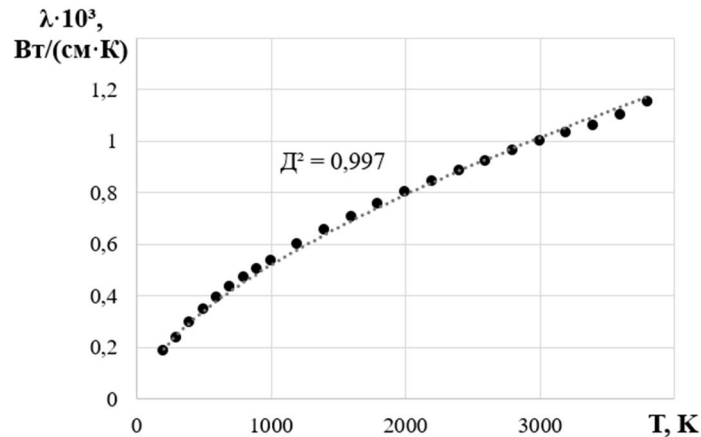


Рисунок 3 – Аппроксимация табличных данных теплопроводности азота

Figure 3 – Approximation of tabular data on nitrogen thermal conductivity

После аппроксимации, коэффициент достоверности D^2 которой составляет 0,997, получаем новую упрощенную зависимость $\lambda(T)$:

$$\lambda(T) = a \cdot T^b,$$

где $a = 8 \cdot 10^{-6}$; $b = 0,610$.

С учетом этой зависимости распределение температуры по сечению разрядного канала описывается выражением:

$$T(r) = \left[T_{\text{ст}}^{b+1} + \frac{q_v(b+1)}{4a} (R^2 - r^2) \right]^{\frac{1}{b+1}}. \quad (5)$$

Определим теперь распределение концентрации молекул по сечению при условии, что их количество в разрядном канале интегрально должно сохраняться. Если система замкнута, то давление не может быть постоянным.

Для нахождения выражения концентрации молекул по сечению разрядного канала использовались уравнение термодиффузии для стационарного случая и интегральное условие для числа молекул газа в разрядном канале (количество молекул остается постоянным) [9]:

$$\frac{dn}{dr} = - \frac{D_T}{D} \cdot \frac{n}{T} \frac{dT}{dr}, \quad (6)$$

где n – концентрация молекул, см^{-3} ; D_T – коэффициент термодиффузии, $\text{см}^2/\text{с}$; D – коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$.

Если число молекул газа остается постоянным, то:

$$\int_0^R n(r) \cdot 2\pi R L dr = \frac{p_0 \pi R^2 L}{kT_0}, \quad (7)$$

где L – длина разрядного канала, см; p_0 – начальное давление; k – постоянная Больцмана; T_0 – начальная температура.

В результате решения системы уравнений (6), (7) было найдено общее выражение (8), описывающее распределение концентрации молекул газа по сечению разрядного канала:

$$n(r) = \frac{p_0 R^2}{2kT_0 \int_0^R \left(\frac{T_m}{T(r)} \right)^\alpha r dr} \left(\frac{T_m}{T(r)} \right)^\alpha, \quad (8)$$

где T_m – температура на оси канала; α – безразмерный параметр, равный отношению коэффициентов термодиффузии и диффузии.

Результаты расчетов и их обсуждение

Профили температуры $T(r)$ и концентрации молекул азота $n(r)$ при различных уровнях накачки приведены на рисунках 4 и 5. Для более удобного восприятия графиков концентраций молекул был построен опорный график для уровня накачки в 25 Вт, относительно которого легко можно проследить изменения концентрации на оси разрядного канала и его стенках.

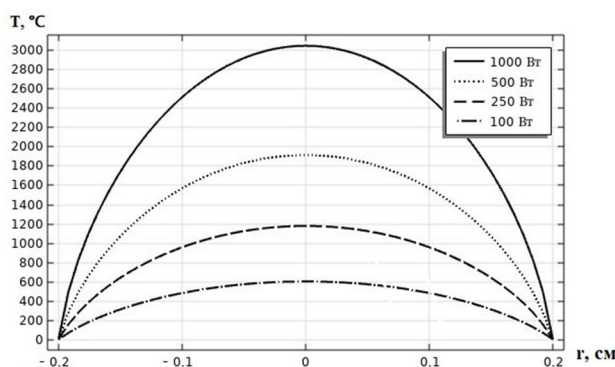


Рисунок 4 – Распределение температуры по радиусу разрядного канала для четырех значений средней мощности накачки

Figure 4 – Temperature distribution along discharge channel radius for four values of average pumping power

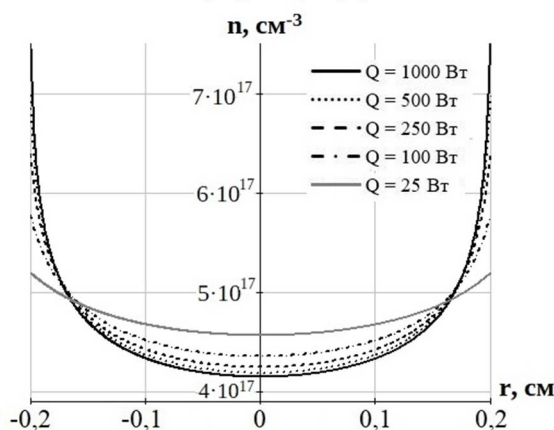


Рисунок 5 – Распределение концентрации молекул по сечению разрядного канала при различных вводимых мощностях накачки

Figure 5 – Distribution of molecules concentration over discharge channel cross-section at different input pumping power

Рост частоты повторения импульсов накачки приводит к значительному увеличению тепловой мощности, которая идет на нагрев рабочего газа. Из приведенных на рисунке 4

зависимостей видно, что для мощности накачки 100 Вт температура молекулярного азота составляет $\approx 500^\circ\text{C}$, а при 1000 Вт температура становится выше 3000°C .

Достижение таких высоких значений температуры газа может приводить к термической диссоциации и термической ионизации молекул азота. Однако оценки степени диссоциации и степени ионизации по формуле Саха для максимальной температуры в 3000°C дают значения в десятые и сотые доли процента. Т. е. газовый состав в разрядном канале в этих условиях не изменяется.

Достижение на оси разрядного канала температур в сотни и тысячи градусов приводит к перераспределению концентрации молекул азота по сечению разрядного канала: чем выше температура на оси, тем меньше концентрация молекул азота в центральной области. Поскольку общее количество молекул в сечении разрядного канала остается постоянным, то с повышением мощности накачки будет расти отношение концентрации молекул в пристеночных областях к концентрации молекул на оси канала (n_R/n_0). При увеличении мощности накачки от 100 до 1000 Вт это отношение изменяется с 1,33 до 1,85.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что плазма разряда в длинной трубке при повышении частоты повторения импульсов накачки локализуется в ее центральной части.

Заключение

1. В импульсно-периодическом азотном лазере низкого давления с накачкой продольным разрядом температура азота по центру разрядного канала изменяется от 500°C до 3000°C при увеличении уровня накачки в диапазоне от 100 Вт до 1000 Вт (200 – 2000 Гц при энергии накачки $W \approx 0,5$ Дж).

2. Отношение (n_R/n_0) концентрации молекул у стенок разрядного канала к концентрации молекул азота в центральной части канала увеличивается с уровня 1,33 до 1,85 при увеличении температуры от 500°C до 3000°C .

3. Снижение концентрации молекул азота по центру разрядного промежутка относительно стенок способствует интенсификации ионизационных процессов именно по его центральной части, что в свою очередь, облегчает пробой разрядного промежутка не по стенкам канала, а по газовой среде.

Библиографический список

1. **Вейко В.П.** Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике. Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2011. 141 с.
2. Азотные лазеры АО «Плазма»: <https://www.plasmalabs.ru/category/index/id/18>.
3. **Kozlov B.A., Stepanov A.P.** Pumping conditions and cross-section laser power distribution in low pressure nitrogen laser // St.-Petersburg. Russia. 4-8 2018. Laser Optics. 18-th International Conference. P. 68.
4. **Козлов Б.А., Логин И.В.** Импульсные генераторы для накачки азотных лазеров низкого давления на частотах повторения импульсов до 10 кГц // Proceedings of 8-th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects/Tomsk: TPU Publishing House, 2022. Pp.531-536.
5. **Недоспасов А.В.** О некоторых явлениях при зажигании электрических разрядов в длинных трубках // ТВТ, 2013. Т. 51. № 4. С. 483-487.
6. **Токунов Ю.М., Асиновский Э.И., Василяк Л.М.,** Динамика развития наносекундного разряда в азоте и генерации лазерного излучения // ТВТ, 1981. Т. 19. № 3. С. 491-496.
7. **Абрамов А.Г., Асиновский Э.И., Василяк Л.М.,** Исследование пространственно-временной динамики волн накачки и волн излучения в азотном лазере // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 9. С. 1824-1828.
8. **Ражев А.М., Чуркин Д.С., Ткаченко Р.А.,** Азотный лазер с накачкой импульсным продольным электрическим и индукционным разрядами // Письма в ЖТФ, 2023. Т. 49. № 20. С. 8-10.
9. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. М.: Наука. 1972. 736 с.
10. **Месси Г., Бархоп Е.** Электронные и ионные столкновения. М.: ИЛ, 1958. С. 604.

UDC 621.373.826

TEMPERATURE AND CONCENTRATION DISTRIBUTIONS OF NITROGEN MOLECULES OVER DISCHARGE CHANNEL CROSS-SECTION OF LOW-PRESSURE N₂-LASER

B. A. Kozlov, Dr. in physics and mathematical sciences, full professor, Department of Industrial Electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5957-3688, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

Z. V. Shvets, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0006-7259-337X, e-mail: zlatashvetsv@gmail.com

Temperature and nitrogen molecule concentration distributions across discharge channel in low-pressure nitrogen laser with longitudinal discharge pumping in pulsed-periodic mode ($F = 200 - 2000$ Hz, pumping energy $W = 0,5$ J) were obtained using analytical methods. At maximum average pump power of $P = 1$ kW the temperature in the center of discharge channel reaches 3000 °C, and the concentration of nitrogen molecules in the center of discharge channel decreases by a factor of 1,4 compared to the concentration of molecules near the walls. This information is useful for understanding breakdown mechanism in pulsed-periodic mode and for establishing the relationship between distribution of laser power across the beam and the processes in discharge channel.

Keywords: low-pressure nitrogen laser, discharge channel, heat transfer, distribution of temperature and molecule concentration across the discharge channel, average pumping power.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-189-195

References

1. **Veiko V.P.** Lazernye mikro- i nanotekhnologii v mikroelektronike. (Laser micro- and nanotechnologies in microelectronics). *Sankt-Peterburg, NIU ITMO*. 2011, p. 141. (in Russian).
2. Azotnyje lasery AO «Plazma» (Nitrogen lasers JSC «Plasma»): <https://www.plasmalabs.ru/category/index/id/18>. (in Russian).
3. **Kozlov B.A., Stepanov A.P.** Pumping conditions and cross-section laser power distribution in low pressure nitrogen laser. St.-Petersburg. Russia. 4-8 2018. *Laser Optics. 18-th International Conference*. p. 68.
4. **Kozlov B.A., Login I.V.** Impul'snye generatory dlya nakachki azotnykh lazerov nizkogo davleniya na chastotakh povtoreniya impul'sov do 10 KGc (Pulse generators for pumping low-pressure nitrogen lasers at pulse repetition rates up to 10 kHz). Proceedings of 8-th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. *Tomsk: TPU Publishing House*. 2022, pp. 531-536. (in Russian).
5. **Nedospasov A.V.** O nekotorykh yavleniyakh pri zazhiganiy ehlektricheskikh razryadov v dlinnykh trubkakh (On some phenomena associated with the ignition of electric discharges in long tubes). *TVT*. 2013, vol. 51, № 4, pp. 483-487. (in Russian).
6. **Tokunov Yu.M., Asinovsky E.I., Vasilyak L.M.** Dinamika razvitiya nanosekundnogo razryada v azote i generacii lazernogo izlucheniya (*Dynamics of the development of a nanosecond discharge in nitrogen and the generation of laser radiation*). *TVT*. 1981, vol. 19, is. 3, pp. 491-496. (in Russian).
7. **Abramov A.G., Asinovsky E.I., Vasilyak L.M.** Issledovanie prostranstvenno-vremennoj dinamiki voln nakachki i voln izlucheniya v azotnom lazere (Study of the space-time dynamics of pump waves and emission waves in a nitrogen laser). *Quantovaya elektronika*. 1983, vol. 10, № 9, pp. 1824-1828. (in Russian).
8. **Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A.** Azotnyj lazer s nakachkoj impul'snym prodol'nym ehlektricheskim i indukcionnym razryadami (Nitrogen laser pumped by pulsed longitudinal electric and induction discharges). *Pis'ma v ZhTF*. 2023, vol. 49, is. 20, pp. 8-10. (in Russian).
9. **Tikhonov A.N., A.A. Samarsky.** Uravneniya matematicheskoy fiziki. (Equations of mathematical physics). M.: Nauka. 1972, p. 736. (in Russian).
10. **Messi G., Barhop E.** Elektronnyye i ionnyye stolknoveniya. (*Electronic and ion collisions*). M.: IL, 1958, p. 604. (in Russian).