

# **Влияние теплопроводности конструкционных материалов на эффективность пластинчатых радиаторов многоканальных модулей лазеров с ядерной накачкой**

**А. Н. Сизов**

*Представлены результаты расчетных исследований эффективности пластинчатых радиаторов, предназначенных для промежуточного охлаждения газа в многоканальных модулях лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН). Показано, что зависимость эффективности радиаторов от коэффициента теплопроводности его теплоотбирающих пластин имеет ярко выраженный максимум, что открывает возможности для оптимизации выбора материалов при проектировании стационарных многоканальных модулей ЛЯН.*

Для ЛЯН, работающих в стационарном режиме, была предложена концепция системы с поперечной прокачкой газа [1, 2]. Система представляет собой набор лазерных каналов прямоугольного сечения с плоскими урановыми слоями шириной порядка 100 мм, нанесенными на внутреннюю поверхность боковых стенок каналов, параллельных направлению газового потока. Для охлаждения разогреваемой в канале смеси на его выходе размещается радиатор в виде набора тонких пластин, располагаемых параллельно потоку газа (и перпендикулярно урановым слоям). На входе в канал ставится такой же радиатор, который позволяет за счет теплообмена газа с пластинами задать вдоль всей длины лазера требуемую входную температуру рабочей смеси и выровнять ее скорость. Охлаждаемый жидким теплоносителем пластинчатый радиатор, прилегающий непосредственно к лазерному каналу, имеет вид, представленный на рис. 1.

Весьма важным является вопрос о влиянии материала пластинок радиатора на эффективность его действия. И хотя в рассматриваемом радиаторе явно выделяются два взаимно перпендикулярных направления теплопередачи (снижение теплосодержания газа в направлении его

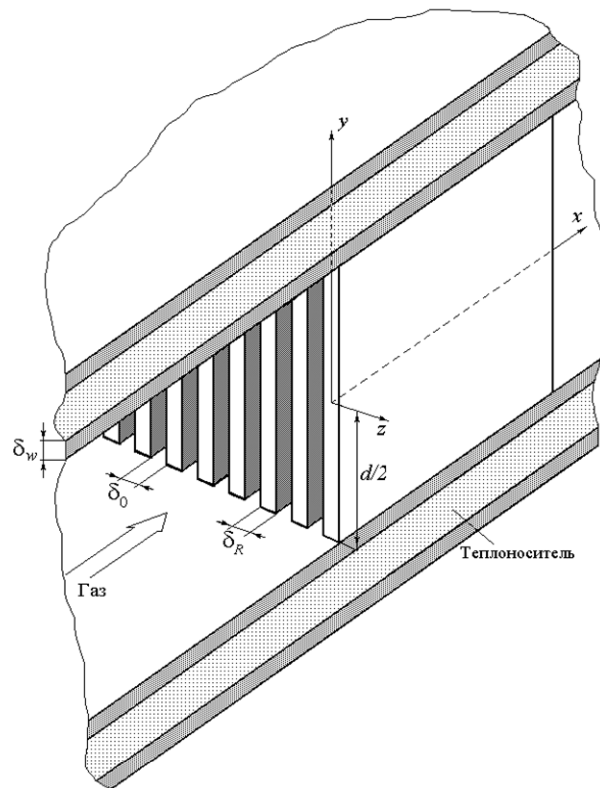


Рис. 1. Пластинчатый радиатор

движения и перенос тепла по пластинкам к охлаждаемой подложке), на первый взгляд кажется очевидным, что чем выше коэффициент теплопроводности пластинок, тем эффективнее передача отбираемого пластинками от газа тепла внешнему теплоносителю. В действительности дело обстоит сложнее. Так, например, в радиаторе с пластинками, обладающими большей теплопроводностью, реализуются более интенсивные отбор тепла у газа и выравнивание температуры в поперечном направлении вдоль оси  $y$ . Но этот процесс приводит к уменьшению градиентов температуры в направлении оси  $y$ . Не исключена ситуация, когда поток тепла, определяемый произведением коэффициента теплопроводности на градиент температуры, на границе контакта пластинки с ее подложкой может оказаться меньше, чем при более малой теплопроводности пластинок, т. е. может возникнуть конкуренция двух указанных процессов. В этом случае возникает задача на оптимизацию коэффициента теплопроводности, что фактически является задачей по оптимальному подбору материала пластинок.

В работе [3] в приближении независимости коэффициентов теплопроводности пластин радиатора и сопряженных с ними стенок было получено решение задачи о пространственном распределении температуры газа в таком радиаторе и его пластинах

$$\tau(x, y) = T_l + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{s_{2n} - s_{1n}} \{s_{2n} \exp(s_{1n}x) - s_{1n} \exp(s_{2n}x)\} \cos\left(\frac{2\beta_n}{d}y\right), \quad (1)$$

$$T(x, y) = \tau(x, y) + \frac{1}{\alpha_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n s_{1n} s_{2n}}{s_{2n} - s_{1n}} \{\exp(s_{1n}x) - \exp(s_{2n}x)\} \cos\left(\frac{2\beta_n}{d}y\right), \quad (2)$$

где  $\beta_n$  – спектр собственных значений задачи. Он определяется трансцендентным уравнением

$$\operatorname{tg} \beta_n = \frac{hd}{2\beta_n}; \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

а параметры  $s_{1n}$  и  $s_{2n}$  являются отрицательными корнями характеристического уравнения (третий корень положителен и неограниченно растет с ростом  $n$ );

$$s^3 + \alpha_0 s^2 - (\lambda_n + H)s - \alpha_0 \lambda_n = 0, \quad (4)$$

где  $\lambda_n = \frac{4\beta_n^2}{d^2}$ .

Входящие в эти соотношения параметры  $H$ ,  $\alpha_0$  и  $h$  определяются следующим образом:

$$H = \frac{\alpha}{k_R \delta_R}; \quad \alpha_0 = \frac{\alpha}{c_P \rho_0 V_0 \delta_0}; \quad h = \frac{\delta_0 + \delta_R}{\delta_R k_R \left[ \frac{1}{\alpha_l} + \frac{\delta_w}{k_w} \right]} \varphi. \quad (5)$$

В формулах (1)–(5)  $c_P$  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;  $d$  – высота пластин радиатора, равная расстоянию между урановыми слоями канала;  $k_R$  – коэффициент теплопроводности пластин радиатора;  $k_w$  – коэффициент теплопроводности подложки радиатора;  $T$  – температура пластин радиатора, усредненная по их ширине;  $T_l$  – температура жидкого теплоносителя;  $V_0$  – скорость газа между пластинами в радиаторе;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи в плоской щели;  $\alpha_l$  – коэффициент теплоотдачи к жидкости;  $\delta_0$  – расстояние между пластинами радиатора (ширина газового зазора);  $\delta_R$  – толщина пластины радиатора;  $\delta_w$  – толщина подложки радиатора;  $\tau$  – температура газа, усредненная по ширине газового зазора;  $\rho_0$  – плотность газа на входе в радиатор;  $\varphi$  – поправочный коэффициент, который учитывает влияние дополнительного термического сопротивления, возникающего из-за неидеальности теплового контакта пластин радиатора с подложкой, вследствие их шероховатости.

Коэффициенты  $C_n$  имеют вид

$$C_n = \frac{\int_0^{d/2} f(y) \cos\left(\frac{2\beta_n}{d}y\right) dy - \frac{dT_l}{2\beta_n} \sin \beta_n}{\|\Phi_n\|^2}, \quad (6)$$

где  $f$  – поперечное распределение температуры газа на входе в радиатор.

Квадрат нормы

$$\|\Phi_n\|^2 = \frac{d}{4} + \frac{d}{8\beta_n} \sin 2\beta_n.$$

Данные решения получены в приближении  $T_l(x) = const$ , т. е. при условии, что приращение температуры охлаждающего теплоносителя в пределах протяженности радиатора должно быть пренебрежимо мало, в частности, по сравнению с перепадом температуры газа между входом и выходом радиатора. Последнее требование означает, что должно выполняться условие

$$\frac{c_p \rho_0 V_0 d}{c_{p_l} \rho_l U \delta_l} \frac{\delta_0}{\delta_0 + \delta_R} \ll 1, \quad (7)$$

где  $d$  – высота пластин радиатора;  $c_{p_l}$  – теплоемкость жидкого теплоносителя при постоянном объеме;  $U$  – скорость жидкого теплоносителя;  $\delta_l$  – высота канала жидкого теплоносителя;  $\rho_l$  – плотность жидкого теплоносителя.

Проведенные на трех типах радиаторов эксперименты [4] показали, что относительное отличие эффективности радиаторов, рассчитываемой с использованием приведенного выше решения, от эффективности, определяемой в эксперименте, не превосходит 15 %. Указанная эффективность определяется как

$$\chi = \frac{\tau(0) - \tau(L)}{\tau(0) - T_l}, \quad (8)$$

где  $L$  – длина радиатора в направлении потока газа;  $\tau(0)$  – усредненная по поперечному сечению температура газа на входе в радиатор;  $\tau(L)$  – усредненная по поперечному сечению температура газа на выходе из радиатора.

Как видно из равенств (1)–(6), материал пластинок радиатора влияет на конечный результат расчета только через коэффициент теплопроводности. Для исследования этого влияния была проведена серия расчетов, в которых коэффициент теплопроводности менялся в пределах от 30 до 500 Вт/м·К без привязки к конкретному материалу. Общими для всех вариантов в проведенных расчетах были следующие параметры: скорость водного теплоносителя –  $U = 0,57$  м/с; высота его канала –  $\delta_l = 3,5$  мм; его температура –  $T_L = 15$  °С. Скорость газа непосредственно перед входом в радиатор варьировалась от 2,5 до 10 м/с; ширина зазора  $\delta_0$  между пластинами радиатора – от 0,015 до 0,06 см; толщина пластин  $\delta_R$  – от 0,015 до 0,06 см; длина пластин  $L$  – от 1 до 4 см.

Расчеты были проведены для гелия (давление  $P = 2,5 \cdot 10^5$  Па) и аргона ( $P = 0,5 \cdot 10^5$  Па) при однородном по сечению распределении температуры на входе в радиатор  $\tau(0) = 50$  °С. Выбранные значения давлений являются оптимальными для канала с поперечным размером  $d = 2$  см [5]. Во всех исследованных вариантах явно прослеживается наличие оптимума в зависимости эффективности радиатора от коэффициента теплопроводности пластин. На рис. 2 и 3 приведены результаты расчетов зависимости эффективности охлаждения гелия и аргона в радиаторе с параметрами  $\delta_0 = 0,3$  мм;  $\delta_R = 0,3$  мм;  $L = 30$  мм от коэффициента теплопроводности его пластин. Скорость газа перед входом в радиатор  $V = V_0 \cdot \delta_0 / (\delta_0 + \delta_R) = 5,5$  м/с.

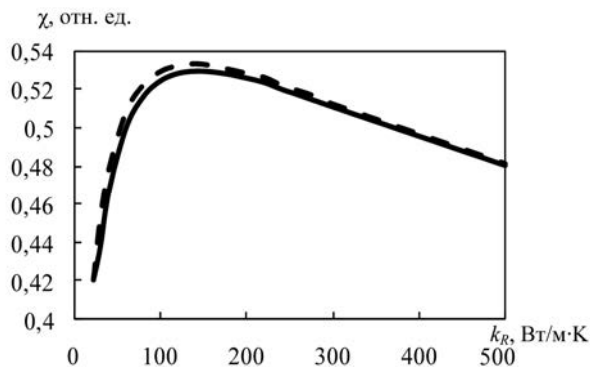


Рис. 2. Зависимость эффективности радиатора от коэффициента теплопроводности его пластин для He ( $P = 2,5 \cdot 10^5$  Па): ——— — однородное распределение температуры на входе, - - - - - неоднородное распределение температуры на входе

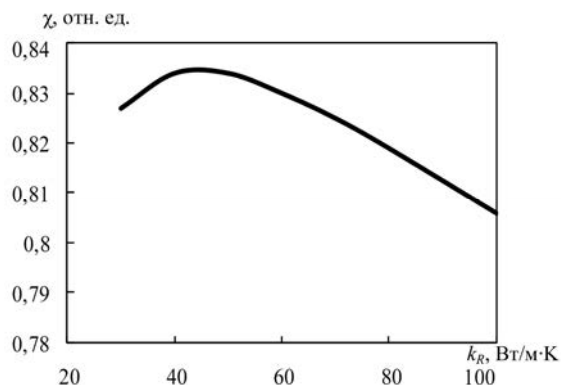


Рис. 3. Зависимость эффективности радиатора от коэффициента теплопроводности его пластин для Ar ( $P = 0,5 \cdot 10^5$  Па)

Аналогичные зависимости для трех различных значений скорости газа при тех же параметрах  $\delta_0 = 0,3$  мм;  $\delta_R = 0,3$  мм;  $L = 30$  мм приведены на рис. 4. Влияние протяженности пластинок отражает рис. 5.

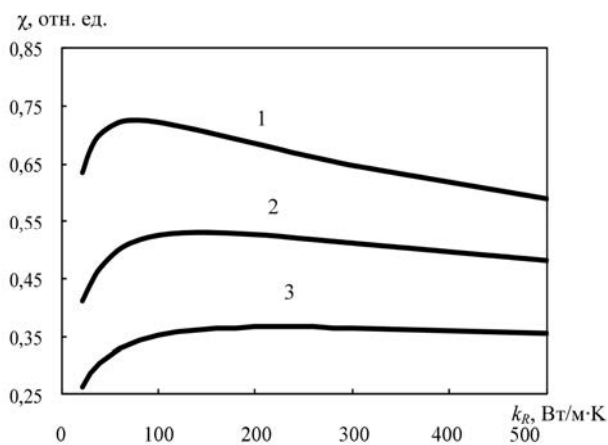


Рис. 4. Зависимость эффективности радиатора от коэффициента теплопроводности пластинок (для He при  $P = 2,5$  атм) при скоростях газа: 1 –  $V = 2,5$  м/с; 2 –  $V = 5,5$  м/с; 3 –  $V = 10$  м/с

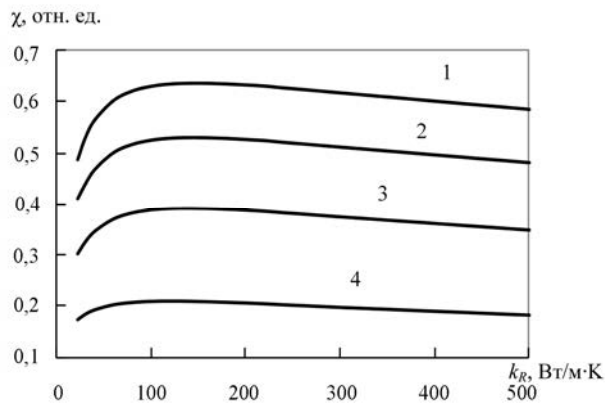


Рис. 5. Зависимость эффективности от коэффициента теплопроводности пластинок (для He при  $P = 2,5$  атм;  $V = 5,5$  м/с;  $\delta_0 = 0,03$ ;  $\delta_R = 0,03$  см) при 1 –  $L = 4$  см; 2 –  $L = 3$  см; 3 –  $L = 2$  см; 4 –  $L = 1$  см

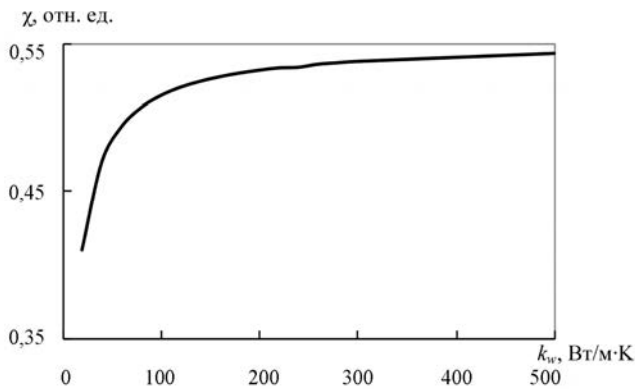


Рис. 6. Зависимость эффективности от коэффициента теплопроводности подложки радиатора (для He при  $P = 2,5$  атм;  $T_L = 15$  °C;  $L = 3$  см) при  $k_R = 2,4$  Вт/м·К

сти, толщины пластин, расстояния между ними, протяженности радиатора. Этот факт открывает широкие возможности как подбором материала пластин, так и вариациями перечисленными выше параметрами, для достижения наивысшей эффективности радиаторов при проектировании многоканальных модулей ЛЯН.

Зависимость эффективности радиатора от коэффициента теплопроводности его подложки – наоборот, монотонно нарастающая функция этого коэффициента. При малых значениях коэффициента она нарастает очень круто, но начиная примерно со значений, свойственных таким металлам, как алюминий, ее нарастание весьма невелико.

Для выяснения вопроса, насколько ощутимо сказывается на эффективности отличие реального профиля распределения температуры на входе в радиатор от однородного, была проведена отдельная серия расчетов с профилем температуры, полученным из двумерных расчетов течения газа в предшествующем радиатору лазерном канале. Расчеты проводились по методике, изложенной в работе [3]. Для гелия при  $P = 2,5$  атм средняя температура  $\tau(0) = 50$  °C и скорость  $V = 5,5$  м/с на выходе из канала (входе в радиатор) согласно расчетам возникают при следующих параметрах канала: температура газа на входе в канал  $\tau_{вх} = 20$  °C, скорость  $U_0 = 5$  м/с, ширина лазерного канала  $d = 20$  мм, его протяженность в направлении движения газового потока  $b = 60$  мм, плотность урана в активном слое  $\rho_U = 18,7$  г/см<sup>3</sup>, толщина этого слоя  $\delta_U = 2,25 \cdot 10^{-3}$  мм, сам слой покрыт защитной пленкой алюминия толщиной 0,5 мкм, плотность делений ядер урана в активном слое  $q = 7 \cdot 10^{15}$  дел/(см<sup>3</sup>с). На рис. 2 для сопоставления пунктиром приведена зависимость эффективности для неоднородного профиля температуры. Как и следовало ожидать, эффективность радиаторов рассмотренных протяженностей очень слабо зависит от профиля температуры на входе.

Соответствующие расчеты были проведены и для установления зависимости эффективности от коэффициента теплопроводности подложек, на которые опираются пластинки радиатора. Наблюдается простой монотонный рост без наличия экстремума (рис. 6).

В результате серии проведенных исследований было установлено:

- зависимость эффективности радиатора от коэффициента теплопроводности его пластин не является монотонно нарастающей функцией этого коэффициента. С ростом коэффициента теплопроводности эффективность вначале круто нарастает, достигая максимума, а затем спадает. Положение максимума зависит от сорта газа, его скорости

## Список литературы

1. Боровков В. В., Лажинцев Б. В., Нор-Аревян В. А. и др. Особенности газодинамики прокачных лазеров, возбуждаемых осколками деления ядер урана // Квантовая электроника. 1995. Т. 22, № 12. С. 1187–1191.
2. Пат. № 3207271/25 (1984). Газовый лазер / В. В. Боровков, Б. В. Лажинцев, В. А. Нор-Аревян и др. // Изобретения. 1996. № 5.
3. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.
4. Гаранин А. В., Пунин В. Т., Сизов А. Н. Эффективность радиаторов многоканальных модулей лазеров с ядерной накачкой // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4, № 11–12. С. 983–988.
5. Сизов А. Н. О связи пространственных неоднородностей накачки с мощностью генерации лазеров, возбуждаемых осколками деления урана // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20, № 9. С. 64–67.

## **Effect of Thermal Conductivity of Structural Materials on the Efficiency of Plate Radiators of Multichannel Modules of Nuclear-Pumped Lasers**

**A. N. Sizov**

*Presents the results of studies of efficiency of plate radiators, intended for intermediate cooling of the gas in multichannel units of NPL. It is shown that dependency of radiator efficiency from thermal conductivity of their plates has brightly denominated maximum, that opens up the possibility of optimization of the choice material when designing the stationary multichannel units of NPL.*