

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАСТИНЧАТЫХ РАДИАТОРОВ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ ЛАЗЕРОВ С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ

INFLUENCE OF HEAT CONDUCTION OF MATERIALS ON EFFICIENCY OF PLATE RADIATORS MULTICHANNEL UNITS OF NUCLEAR PUMPED LASERS

А. Н. Сизов

A. N. Sizov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Представлены результаты расчетных исследований эффективности пластинчатых радиаторов, предназначенных для промежуточного охлаждения газа в многоканальных модулях 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.

This report contains 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.

Для лазеров с ядерной накачкой (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 движения и перенос тепла по пластинкам к охлаждаемой подложке), на первый взгляд кажется очевидным, что чем выше коэффициент теплопроводности пластинок, тем эффективней передача отбираемого пластинками от газа тепла внешнему теплоносителю. В действительности дело обстоит сложнее. Так, например, в радиаторе с пластинками, обладающими большей теплопроводностью, реализуется более интенсивный отбор тепла у газа и более интенсивное выравнивание температуры в поперечном направлении вдоль оси y . Но этот процесс приводит 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 пластинки. 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.

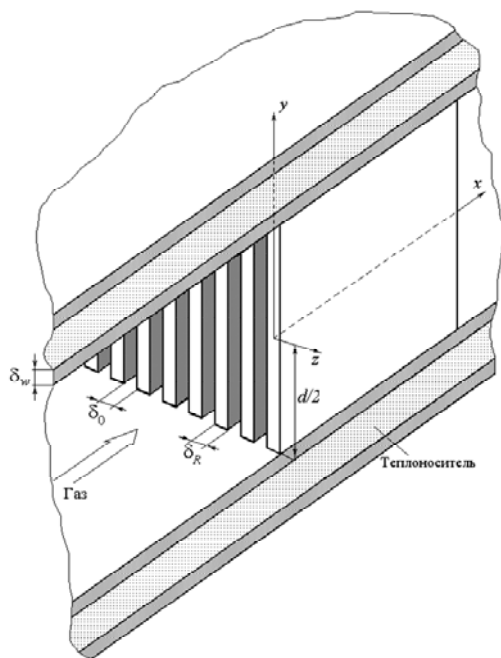


Рис. 1. Пластинчатый радиатор

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 движения и перенос тепла по пластинкам к охлаждаемой подложке), на первый взгляд кажется очевидным, что чем выше коэффициент теплопроводности пластинок, тем эффективней передача отбираемого пластинками от газа тепла внешнему теплоносителю. В действительности дело обстоит сложнее. Так, например, в радиаторе с пластинками, обладающими большей теплопроводностью, реализуется более интенсивный отбор тепла у газа и более интенсивное выравнивание температуры в поперечном направлении вдоль оси y . Но этот процесс приводит 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 пластинки. 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 [3] в приближении независимости коэффициентов теплопроводности пластин радиатора и сопряженных с ними стенок от температуры было получено решения задачи о пространственном распределении температуры газа в таком радиаторе и в 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 β_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 , α_0 и h определяются следующим образом

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

Здесь 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; α – коэффициент теплоотдачи в плоской щели; α_l – коэффициент теплоотдачи к жидкости; δ_0 – расстояние между пластинами радиатора (ширина газового зазора); δ_R – толщина пластины радиатора; δ_w – толщина подложки радиатора; τ – температура газа, усредненная по ширине газового зазора; ρ_0 – плотность газа на входе в радиатор; φ – 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 равен

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

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

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

где d – высота пластин радиатора; c_{Pl} – теплоемкость жидкого теплоносителя при постоянном объеме; U – скорость жидкого теплоносителя; δ_l – высота канала жидкого теплоносителя; ρ_l – его 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 δ_0 между пластинами радиатора – от 0,015 до 0,06 см; толщина пластин δ_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 рисунках 2 и 3 для иллюстрации 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. 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.

χ , отн. ед.

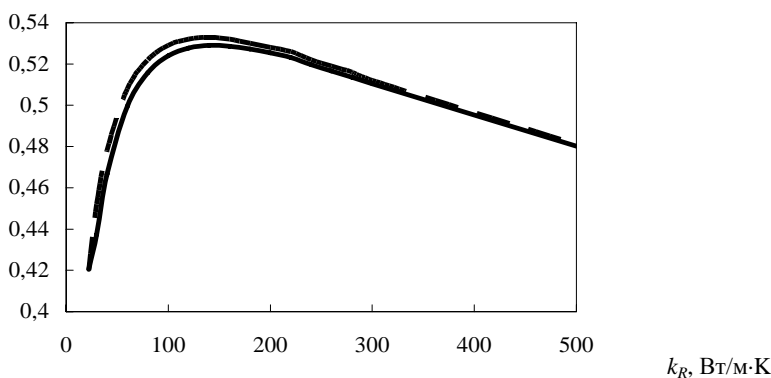


Рис. 2. Зависимость эффективности радиатора от коэффициента теплопроводности его пластин для He ($P = 2,5 \cdot 10^5$ Па): ———— – однородное распределение температуры на входе; - - - - - неоднородное распределение температуры на входе.

χ , отн. ед.

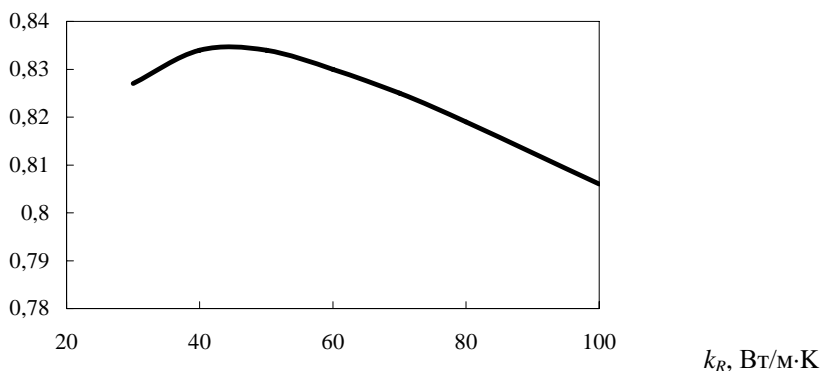


Рис. 3. Зависимость эффективности радиатора от коэффициента теплопроводности его пластин для Ar ($P = 0,5 \cdot 10^5$ Па)

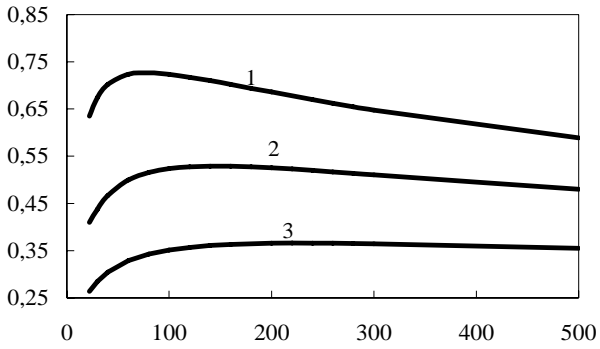
χ , отн. ед. k_R , Вт/м·К

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

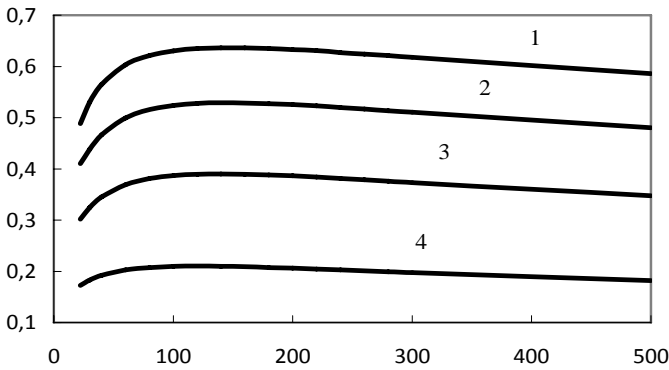
 χ , отн. ед. k_R , Вт/м·К

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.

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 (см. пример на рисунке 6).

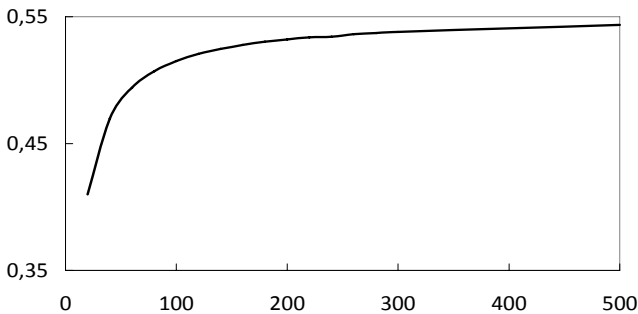
 χ , отн. ед. k_w , Вт/м·К

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

В результате серии проведенных исследований было установлено:

Зависимость эффективности радиатора от коэффициента теплопроводности его пластин не является монотонно возрастающей функцией этого коэффициента. С ростом коэффициента теплопроводности эффективность вначале круто нарастает, достигая максимума, а затем спадает. Положение максимума зависит от сорта газа, его скорости, 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 возрастающая функция этого коэффициента. При малых значениях коэффициента она нарастает очень круто, но начиная примерно со значений, свойственным таким металлам, как алюминий, ее нарастание весьма невелико.

Для выяснения вопроса, насколько ощутимо сказывается на эффективность 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 [3]. Для гелия при $P = 2,5$ атм средняя температура $\tau(0) = 50$ °С 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 $\tau_{ax} = 20$ °С, 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/см³, 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/(см³·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.

Список литературы

1. Боровков В. В., Лажинцев Б. В., Нор-Аревян В. А., Сизов А. Н., Синянский А. А., Федоров Г. Ф. Особенности газодинамики прокачных лазеров, возбуждаемых осколками деления ядер урана // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. № 12. С. 1187–1191.
2. Пат. № 2054775 РФ МПК H01 S3/22. Газовый лазер. Боровков В. В., Лажинцев Б. В., Нор-Аревян В. А., Сизов А. Н., Синянский А. А. // Бюллетень «Изобретения (Заявки и патенты)», 1996, № 5.
3. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров: ФГУП «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.