ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Том 17 1979 № 5

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ В КАНАЛЕ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА

Генин Л. Г., Кузнецов С. М., Саенко Д. В.

Проведено экспериментальное исследование теплоотдачи в кольцевом канале активного элемента твердотельного лазера в диапазоне чисел Рейнольдса от $2\cdot10^3$ до $14\cdot10^3$. На основе экспериментальных данных получена формула для расчета коэффициентов теплоотдачи в ламповом канале и канале активного элемента твердотельных лазеров с моноблочным отражателем.

Эффективность работы твердотельного лазера определяется энергией, выделяемой в импульсе, и частотой следования импульсов, т. е. его мощностью. Естественно стремление к повышению мощности лазерных установок. Однако в связи с нагревом активных элементов твердотельных лазеров свойства генерируемого излучения заметно ухудшаются. Так как практически вся подводимая к лазеру энергия превращается в тепло, то с увеличением мощности необходимо повышать и эффективность их систем охлаждения. Исследования показали, что при энергии в импульсе 600 Дж и частоте следования импульсов до 0,1 Гц (мощности до 60 Вт) необходимый тепловой режим может быть обеспечен воздушной системой охлаждения. Дальнейшее увеличение частоты следования импульсов (до мощностей порядка 1—3 кВт) возможно только при использовании жидкостных систем охлаждения.

При тепловых расчетах твердотельных лазеров с жидкостными системами охлаждения для определения коэффициентов теплоотдачи обычно используется формула для стабилизированного турбулентного течения [1—3]

$$\mathrm{Nu}=0{,}021\mathrm{Re}^{0{,}8}\mathrm{Pr}^{0{,}43}(\mathrm{Pr}_{ж}/\mathrm{Pr}_{c})^{0{,}25}. \qquad (1)$$

В действительности же каналы охлаждения лазерных установок имеют небольшую длину; при входе жидкости в эти каналы наблюдаются значительные местные возмущения; на практике обычно удается реализовать лишь переходные режимы течения. Поэтому возможность применения формулы (1) в этих условиях сомнительна, и желательно проведение специальных экспериментальных исследований теплообмена в каналах твердотельных лазеров.

Именно такое экспериментальное исследование теплоотдачи от поверхности активного элемента проведено нами на макете водоохлаждаемого лазера, в который вместо активного элемента вставлялась трубка из нержавеющей стали, по которой пропускался электрический ток.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В металлическом корпусе *1* расположен кварцевый моноблок-отражатель *2*, имеющий два продольных круглых отверстия: в одно из них вставляется лампа накачки, а во второе — активный элемент. Через образовавшиеся при этом кольцевые каналы прокачивается охлаждающая вода. В процессе экспериментов канал лампы накачки *3* заглушался, а в канал активного эле-

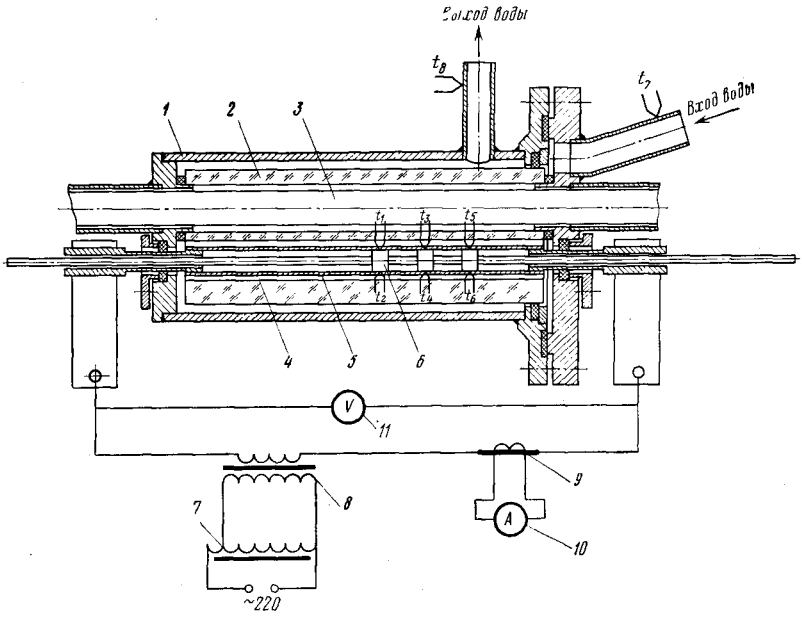

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

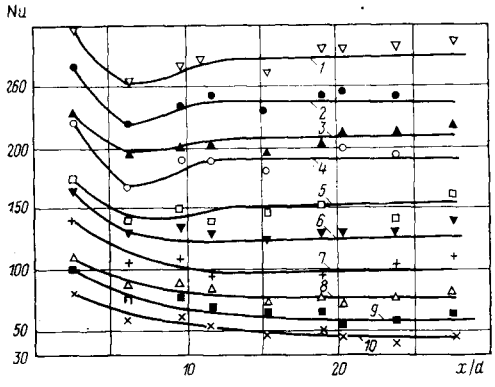

Рис. 2

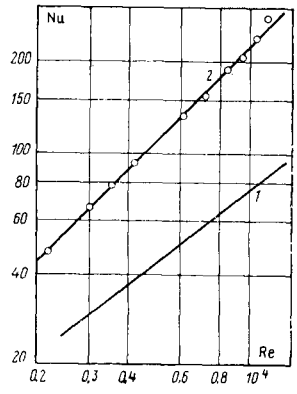

Рис. 3

Рис. 2. Распределения Нуссельта: *1* – Re=13720; *2* – 10573; *3* – 9510; *4* – 8512; *5* – 7244; *6* – 6125; *7* – 4994; *8* – 3563; *9* – 2945; *10* – 2190

Рис. 3. Обобщение данных по числам Нуссельта

мента *4* вставлялся, как об этом уже упоминалось выше, экспериментальный участок *5* в виде трубки из нержавеющей стали диаметром 8 мм с толщиной стенки 0,2 мм и длиной 120 мм. К ее концам припаивались медные токоподводящие электроды. Ширина кольцевого зазора, через который прокачивалась охлаждающая вода, 2 мм. Для измерения температур стенки опытного участка внутри трубки был помещен длинный стержень с тремя фторопластовыми втулками *6*, в которые закладывались медь-константановые термопары t_1—t_6. Стержень свободно перемещался внутри опытной трубки, чем обеспечивалась возможность измерения температуры по всей ее длине. Питание опытного участка электрическим током осуществлялось от регулировочного трансформатора РНО-250-5 *7* через понижающий трансформатор ОСУ 20/6 *8*. Сила тока в цепи, достигавшая 240 А, измерялась с помощью трансформатора тока УТТ-5 *9* амперметром класса 0,5 *10*. Падение напряжения на опытном участке измерялось вольт-

метром класса 0,5 II. При определении мощности, выделяемой в опытном участке, вводилась поправка ~3%, учитывавшая падение напряжения на электродах. Температура охлаждающей воды на входе и выходе из экспериментального участка измерялась термопарами t_7 и t_8. Расход охлаждающей воды измерялся с помощью предварительно оттарированного шайбового расходомера (на схеме не показан).

Эксперименты проводились при значениях электрической мощности, выделяемой в опытном участке, 500 и 900 Вт, что соответствовало плотностям теплового потока на поверхности трубки $2\cdot10^5$ и $3{,}5\cdot10^5$ Вт/м^2. При определении температуры стенки, необходимой для расчета коэффициента теплоотдачи, учитывались перепады температуры в стенке трубы, составлявшие соответственно 1 и 1,8° С. Расход охлаждающей воды изменялся в опытах от 0,0345 до 0,216 кг/с, что соответствовало интервалу чисел Рейнольдса, рассчитанным по эквивалентному гидравлическому диаметру, 2190—13 720. Расхождение теплового баланса во всех опытах не превышало 6%.

Рассчитанные по полученным опытным данным распределения чисел Нуссельта представлены на рис. 2. Следует отметить прежде всего довольно слабое изменение коэффициентов теплоотдачи по длине опытного участка. Это связано, вероятно, с интенсивной турбулизацией потока на входе в кольцевой канал, возможным развитием турбулентности по длине канала в переходной области чисел Рейнольдса и влиянием выходных эффектов на течение в сравнительно коротком канале. Несколько снижаясь на входе, коэффициенты теплоотдачи остаются постоянными, начиная примерно с $x/d=10$. Учитывая, что начальный участок в наших условиях занимает не более 25% общей длины канала, и не считая целесообразным обобщение опытных данных на этом участке, мы далее рассматриваем только числа Нуссельта на стабилизированном участке. Эти значения стабилизированных чисел Нуссельта обобщаются с погрешностью +10% формулой

$$\mathrm{Nu}=0{,}0215\mathrm{Re}, \qquad (2)$$

изображенной на рис. 3 линией *2*. Линия *1* на этом графике соответствует формуле (1). Из этого графика хорошо видно, что экспериментальные значения чисел Нуссельта в 2—2,5 раза превышают рассчитанные по (1). Формулу (2) можно преобразовать, введя обычную зависимость числа Нуссельта от числа Прандтля

$$\mathrm{Nu}=0{,}0094\mathrm{Re}\mathrm{Pr}^{0{,}43}. \qquad (3)$$

Большинство твердотельных лазеров с моноблочными отражателями имеет конструкцию, близкую к изображенной на рис. 1; условия течения в канале охлаждения лампы накачки практически ничем не отличаются от условий течения в канале активного элемента. Поэтому формулы (2), (3) можно рекомендовать для расчета теплоотдачи от активных элементов и ламп накачки в таких лазерных установках в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса.

Московский энергетический институт

Поступила в редакцию 5 XII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. *М. А. Михеев, И. М. Михеева.* Основы теплопередачи. «Энергия», 1973.
2. *В. А. Волохов, Э. Е. Хрычиков, В. И. Киселев.* Системы охлаждения теплонагруженных радиоэлектронных приборов. «Советское радио», 1975.
3. *Б. Р. Белостоцкий, Ю. В. Любавский, В. М. Овчинников.* Основы лазерной техники. «Советское радио», 1972.