

ТЕПЛОВАЯ ПРОКАЧКА В ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫХ ЛАЗЕРАХ

В. В. Александров, В. А. Данильчев, В. Г. Матченко,
В. В. Пустовалов, А. Б. Романов, М. А. Савченко, А. М. Соколов,
А. Ф. Сучков, А. В. Шилдин

УДК 621.300

Аналитически и численным расчетом показано, что при соответствующей геометрии канала и мощности объемного теплоподвода в активной области и объемного теплоотвода в холодильнике мощные газовые электроионизационные ОКГ могут работать с замкнутым циклом течения газа без механических элементов.

Развитие газовых лазеров привело к созданию электроионизационных ОКГ с рабочими объемами в десятки и сотни литров /1/. В целях борьбы с перегревом активной среды в мощных лазерах обычно используют конвективное охлаждение при дозвуковых скоростях. А так как одна и та же газовая смесь используется многократно, то создается замкнутый цикл течения газа. Для создания такого замкнутого цикла в настоящее время используют компрессоры и вентиляторы. Однако наличие вентиляторов связано с рядом неудобств.

С другой стороны, помимо активной области, которую с точки зрения термодинамики замкнутого цикла можно трактовать как нагреватель, в упомянутых ОКГ существует холодильник, т.е. имеются все необходимые составные части тепловой машины. Представляет интерес рассмотреть возможность осуществления замкнутого цикла течения без механического воздействия.

Оказывается, что если полностью пренебречь в нагревателе и холодильнике процессами, приводящими к потерям импульса, то и тогда тепловая прокачка возможна не при всякой геометрии канала. Необходимо, чтобы нагреватель располагался в более широком месте, а холодильник — более узком. Газ, имеющий большую скорость, охлаждать сложно; кроме того, при течении в узких холодильниках возрастают потери на трение, однако для тепловой прокачки такая конфигурация обязательна.

Для исследования тепловой прокатки сформулируем условия, которым должно удовлетворять течение газа в ОКГ. Газ не должен перегреваться в нагревателе выше некоторой температуры (450°K для CO_2 -лазера, 300°K для CO -лазера) при довольно большой удельной вкладываемой мощности $q \sim 10^2 \div 10^3$ Вт/см³, что приводит к необходимости иметь большую скорость потока газа в нагревателе $u \sim (1 \div 2) \cdot 10^2$ м/сек. Кроме того, желательно везде иметь дозвуковое течение, чтобы не образовывалась ударная волна; это налагает определенные условия на профиль канала между нагревателем и холодильником.

Приведенные выше требования приводят к рассмотрению следующей принципиальной схемы рабочей части установки: сильно сужающийся конфузор, в котором газ разгоняется перед входом в активную область, холодильник в еще более узком канале, чем активная область, и диффузор, в котором газ, расширяясь, тормозится. Участок канала от выхода из диффузора до входа в конфузор мы не рассматриваем, моделируя замкнутость течения граничными условиями.

Задача решалась аналитически в квазиодномерной постановке (гидравлическое приближение) и численно в двумерной. Использовалась модель сжимаемой невязкой нетеплопроводной жидкости. Представляют интерес течения, у которых скорость на входе в конфузор $u_0 \sim 10$ м/сек. Для значений давления P и поперечных размеров l_0 , характерных для электроионизационных ОКГ /2/, число Рейнольдса $Re = u_0 l_0 / \nu$ оказывается $\sim 10^6$ (ν - коэффициент кинематической вязкости). Отношение характерного размера δ , в котором сказывается вязкость и теплопроводность, к характерному размеру канала l_0 , $\delta/l_0 \sim Re^{-1/2} \sim 10^{-3} \div 10^{-2}$ /2/. Поэтому при $Re \sim 10^6$, за исключением узкой пристеночной области и, возможно, холодильника, течение газа можно рассматривать как невязкое и нетеплопроводное.

Нагрев газа в резонаторе происходит за счет выделения джоулева тепла. Мощность, выделяемая в единице объема, может быть записана в виде $Q = en_e v_e E$ /3/, где e , n_e , v_e - заряд, плотность и скорость дрейфа электронов под действием приложенного электрического поля E . Пренебрегая узким катодным слоем, можно считать, что $v_e = \mu_e (E/\rho)$ /3/, где μ_e - подвижность электронов. В электроионизационном ОКГ $n_e \sim \rho^{1/2}$ /1/. По порядку величины $E = U/h$, где U - приложенное между катодом и анодом напряжение, h - расстояние между ними. Таким образом, при сделанных

предположениях удельная мощность, выделяющаяся в резонаторе, может быть записана в виде $Q = Q_0/\rho_0/\rho$, где ρ_0 - плотность газа на входе в активную область, $Q_0 = \epsilon n_0 \mu_e U^2 \rho_0^{-1} h^{-2}$. Удельная мощность теплопровода в таком виде использовалась и в квазиодномерных расчетах, и в двумерных. Теплопровод также считался объемным.

При квазиодномерном рассмотрении трение учитывалось только в холодильнике в гидравлическом приближении. Оказалось, что варьируя длину холодильника и удельную мощность теплопровода при заданной длине нагревателя, можно добиться того, что все термодинамические параметры потока на выходе из рабочей части равны их значениям на входе. Из квазиодномерной теории следует, что выгодно охлаждать газ, если его скорость на входе в холодильник близка к скорости звука, т.е. число Маха $M \approx 1$.

Двумерное течение газа в рабочей части канала исследовалось численно. Двумерные уравнения газодинамики для течения сжимаемой невязкой нетеплопроводной жидкости хорошо известны (см. /3/). Теплопровод задавался в следующем виде:

$$Q(x, y, p, \rho) = \begin{cases} Q_0/\rho_0/\rho & \text{в нагревателе,} \\ -Q_{x_0} \frac{T-T_0}{\Delta T_0} & \text{в холодильнике (T - температура} \\ & \text{жидкого азота, 77°K),} \\ 0 & \text{вне нагревателя и холодильника.} \end{cases}$$

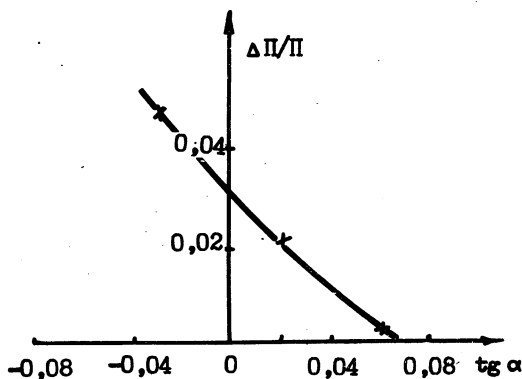
Граничные условия брались в следующем виде:

$$x = 0; \rho = \rho_0; u = u_0; v = v_0 = 0; x = d; p = p_1 = 1 \text{ атм,}$$

условие симметрии в виде $y = 0; v = 0$, На стенке должно удовлетворяться условие непротекания $v/u = f'(x)$, где $f(x)$ - заданное уравнение стенки канала. Здесь v - составляющая скорости газа, перпендикулярная оси симметрии течения, d - длина рабочей части канала.

Искались такие схемы течений, чтобы суммарный импульс на выходе из рабочей части был больше, чем на входе. При этом температура газа на выходе должна быть ниже, чем температура на входе, а скорость выше, чем на входе. В самом деле, неучтенное трение должно повысить температуру газа и замедлить скорость течения.

Изучалось влияние геометрии стенок холодильника и нагревателя, влияние изменения расхода. Оказалось, что холодильник следует делать сужающимся. Однако, геометрия стенок нагревателя оказывает большое влияние на разность суммарных импульсов на выходе

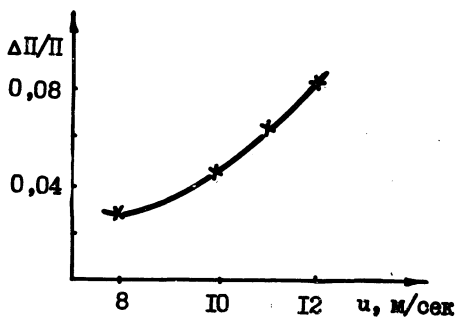


Р и с. I. Зависимость относительной разности суммарных импульсов $\Delta \Pi / \Pi$ на выходе и входе в канал от угла наклона стенки нагревателя

де и на входе. На рис. I представлена зависимость разности суммарных импульсов при изменении геометрии нагревателя. Разность импульсов изменяется от 0,2% при $\text{tg } \alpha = 0,06$ до 5% при $\text{tg } \alpha = -0,03$ (α - угол наклона стенки нагревателя). Из расчетов можно сделать вывод, что при сужении резонатора выигрывает в импульсе увеличивается. Важно отметить, что хотя при сужении нагревателя повышается максимальная температура, но даже при $\text{tg } \alpha = -0,03$ температура не превышает 400°K , что лежит в допустимых для работы лазера с прокачкой пределах. Интерес представляет и тот факт, что с уменьшением $\text{tg } \alpha$ разность между температурой на входе в канал и температурой на выходе уменьшается от 60° при $\text{tg } \alpha = 0,2$ до 8° при $\text{tg } \alpha = -0,03$. Представляется вполне возможным нагрев газа из-за неучтенного трения на 10° , что приведет к тому, что температура газа на входе и на выходе из канала сравнивается, что и требуется для тепловой прокачки.

Исследовалась зависимость разности суммарных импульсов на выходе и входе от расхода газа - скорости газа на входе в канал

(рис. 2). Относительная разность импульсов с увеличением расхода изменяется от 2,8% при $u = 8$ м/сек до 8% при $u = 12$ м/сек. В согласии с квазикодномерным приближением увеличение выигрыша в импульсе связано с тем, что при увеличении скорости газа на вхо-



Р и с. 2. Зависимость относительной разности суммарных импульсов $\Delta П/П$ на выходе и входе в канал от расхода газа (скорости на входе в канал)

де в канал скорость на входе в холодильник приближается к скорости звука. Дальнейшее увеличение скорости невозможно, так как газ будет проходить через звуковую точку между нагревателем и холодильником.

Приведенные расчеты позволяют сделать важный вывод о том, что выигрыш увеличивается при увеличении отношения максимальной и минимальной температуры в канале, причем последняя слабо отличается от температуры на входе. Указанное обстоятельство позволяет предположить, что тепловая прокачка окажется более эффективной для CO -лазера с прокачкой, у которого отношение максимальной температуры в нагревателе и минимальной в холодильнике больше, чем у CO_2 -лазера.

Поступила в редакцию
13 декабря 1976 г.

Л и т е р а т у р а

1. Н. Г. Басов, Э. М. Беленов, В. А. Данильчев, О. М. Керимов, И. Б. Ковш, А. Ф. Сучков, Письма в ЖЭТФ, 14, 421 (1971);
Н. Г. Басов, Э. М. Беленов, В. А. Данильчев, А. Ф. Сучков, Квантовая электроника, 3, 121 (1971).
2. Н. Г. Басов, Э. М. Беленов, В. А. Данильчев, А. Ф. Сучков, УФН, 114, № 2, 213 (1974).
3. Л. Г. Лойцянский. "Механика жидкости и газа". Физматгиз, 1950 г.
4. С. Браун "Элементарные процессы в плазме газового разряда". Госатомиздат, 1961 г.