

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ЛАЗЕРА

Л. М. Виноградский, М. В. Волков, Р. Ф. Имамов, Д. С. Назаров, Ф. А. Стариков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИЛФИ, г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Одним из условий сохранения высокой чистоты газовой среды лазерного объема является отсутствие газовыделений с поверхностей и из масс внутреннего объема лазера. В зависимости от способа получения, хранения и обработки материалы деталей лазера могут содержать и выделять самые разнообразные газы: H_2 , N_2 , O_2 , CO , H_2O и др., присутствие которых, обусловлено либо технологическим процессом плавки, либо атмосферным воздухом.

Газовыделение зависит от очень большого числа факторов, влияющих на результаты измерений газовой среды (предыстория материала и состояние его поверхности, размеры образцов и их форма, изменения давления и температуры в процессе измерений, ошибки метода измерения), точность полученных величин, может значительно отличаться от фактических [1]. Обычно для уменьшения газовой выделений высоковакуумные системы и электровакуумные приборы (лазеры) подвергаются обезгаживанию [2].

В данной работе проведены расчетные оценки газовой выделений из нержавеющей стали 12Х18Н10Т при различных режимах обезгаживания. При этом рассматривались процессы газовой выделений H_2 , N_2 , O_2 как в основном влияющих на энергию генерации лазерной установки. Сделаны оценки влияния газовой выделений на выходную энергию лазерной установки.

Расчет процесса обезгаживания при различных температурах нагрева

Расчет процессов обезгаживания металла от примесей H_2 , O_2 , N_2 проводился для реальной конструкции лазерной установки, имеющей следующие конструктивные параметры:

- марка металла 12Х18Н10Т;
- масса металла 370 кг;
- площадь внутренней поверхности лазерного объема 4,8 м²;
- внутренний объем лазера 50,0 л.

Обезгаживание металлических деталей лазера проводится в вакуумной ($\leq 10^{-5}$ мм рт. ст.) электрической печи при температурах 350 °С, 450 °С, 550 °С и 650 °С.

Расчет потока газов, выделяющихся из деталей, проводится по формуле (1), причем удельное газовыделение материалов при этом определялось выражением (2) [1, 2].

$$Q_{\text{изд}} = q_{\text{Дi}} A_i, \quad (1)$$

где $q_{\text{Дi}}$ – удельное газовыделение материалов, л·торр/см²·с; A_i – площадь поверхностей элементов, см².

$$q_{\text{Д}} = \frac{C_0}{2} \sqrt{\frac{D}{t}}, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация (газосодержание) газа в твердом теле, см³·н.у./см³; D – коэффициент диффузии, см²/с; t – время откачки, с.

На основе вышеприведенных данных рассчитано количество газов содержащихся в металлических деталях лазера (табл. 1) [2].

Таблица 1

Количество газов, содержащихся в стали 12X18H10T и в объеме деталей лазерной установки

Материал	Газосодержание, см ³ н.у./см ³		
	Кислород	Азот	Водород
Сталь 12X18H10T	0,175 [2]	0,403 [2]	0,514-0,87 [2]
Количество газов в объеме деталей лазера, см ³ (н.у.)	8190	18860	28080

Определив скорость газовой выделения каждого газа и количество газов содержащихся в объеме деталей и узлах лазерной установки, было рассчитано время необходимое для полного удаления Н₂, N₂, O₂ из металлических деталей лазера (табл. 2).

Таблица 2

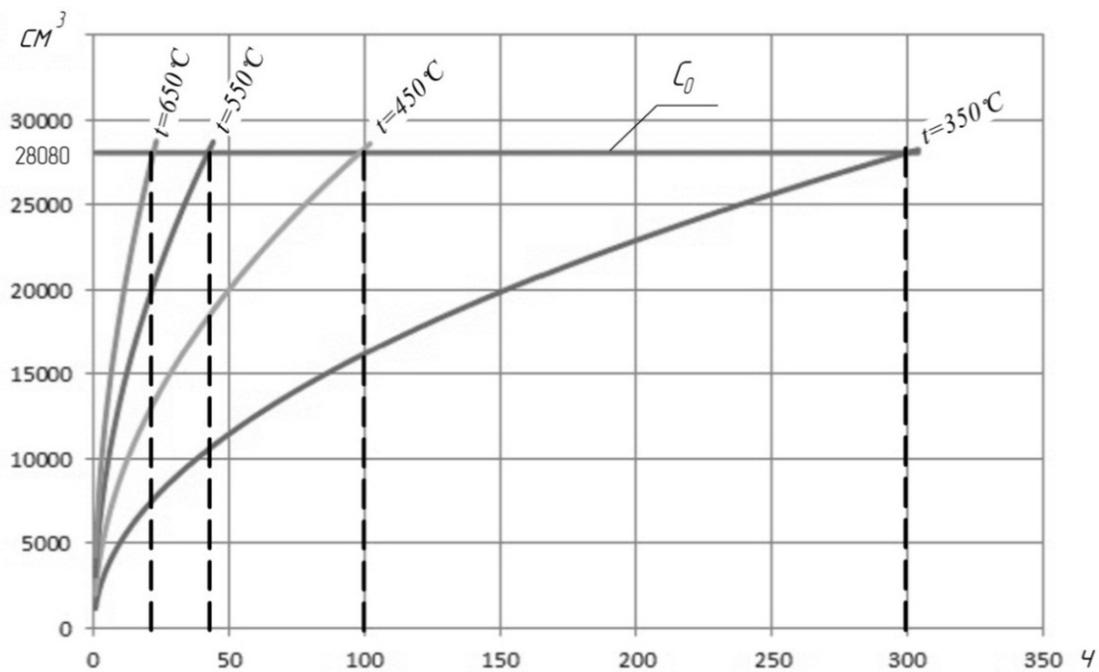
Время обезгаживания необходимое для полного удаления N₂, O₂, H₂ из металлических деталей лазера

Температура обезгаживания, °С	Время обезгаживания, годы		Время обезгаживания, ч
	N ₂	O ₂	H ₂
350	1000000	10000	300
450	20000	3400	99
550	1200	1420	43
650	134	740	22

Как следует из табл. 2 удалить весь азот и кислород не представляется возможным, так как для этого понадобилось бы обезгаживать изделие многие годы. Это объясняется низкими коэффициентами диффузии и малыми скоростями газовой выделения. Из этого можно сделать вывод, что величина газовой выделения N₂ и O₂ мала и не может оказывать существенного влияния на выходную энергию лазерной установки. Основное влияние может оказывать газовой выделение H₂.

На рис. 1 показано, за какое время из деталей лазера будет полностью удален водород. Увеличение температуры позволяет существенно сократить длительность обезгаживания. Так для удаления водорода газосодержанием 28080 см³ из изделия объемом 46800 см³ при $t_{\text{обезг}} = 350$ °С необходимо ~300 ч, при $t_{\text{обезг}} = 450$ °С – ~99 ч, при $t_{\text{обезг}} = 550$ °С – ~43 ч, а при $t_{\text{обезг}} = 650$ °С – только 22 ч. Это объясняется тем, что при повышении температуры обезгаживания возрастает коэффициент диффузии и, следовательно, скорость газовой выделения [3].

В реальных условиях металлические детали и узлы лазерной установки обезгаживаются в электровакуумной печи при температуре нагрева до 350⁺²⁰ °С при вакуумметрическом давлении ~10⁻⁵ мм рт. ст. Для повышения эффективности обезгаживания нагрев проводится ступенчато ($\Delta t \approx 30$ °С) и после достижения температуры в печи ~350⁺²⁰ °С дается выдержка ~70 ч (рис. 2).



C_0 – линия начальной концентрации (газосодержания) газа в металле

Рис. 1. Количество удаленного водорода из изделия в зависимости от времени при различной температуре

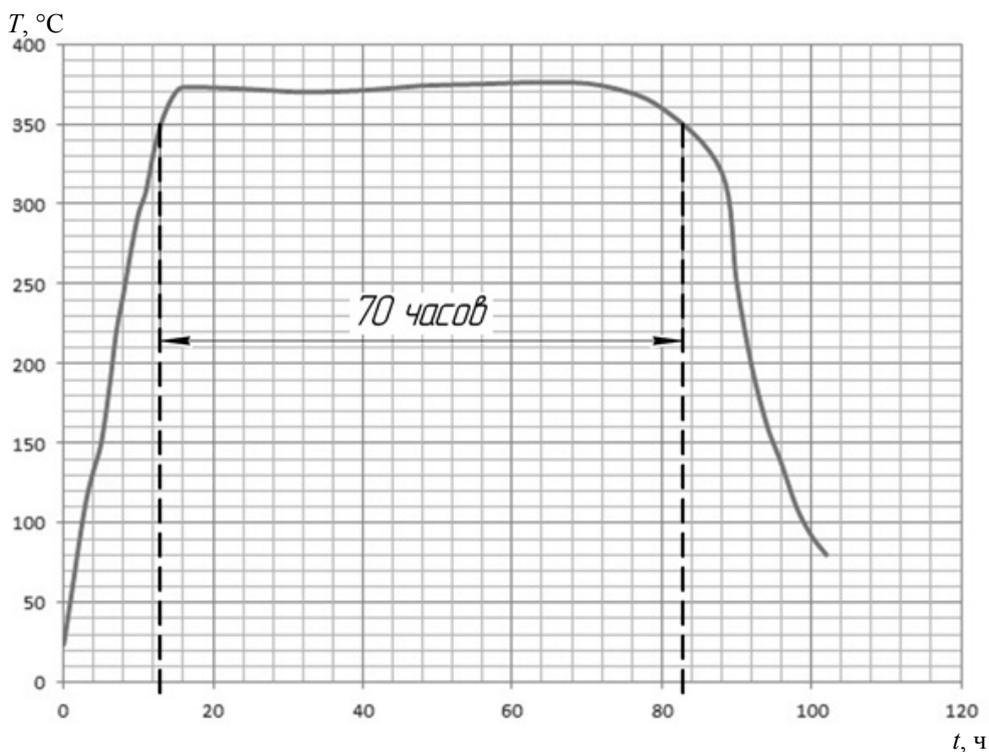


Рис. 2. Реальная зависимость длительности обезгаживания от температуры

Расчет обезгаживания металлических деталей лазера от H_2 показывает, что при температуре обезгаживания $t = 350\text{ }^\circ\text{C}$ для удаления водорода необходимо ~ 300 ч (рис. 1). Сравнивая реальную длительность обезгаживания с расчетной, можно сделать следующие выводы:

– за 70 ч из деталей удаляется $\sim 13600\text{ см}^3$ водорода, что составляет $\sim 49\%$ от начального газосодержания;

– за 70 ч из деталей удаляется $1,7\text{ см}^3$ азота и $7,4\text{ см}^3$ кислорода, что составляет $< 1\%$ от начального газосодержания этих газов;

– для того чтобы полностью удалить водород из деталей лазера необходимо либо увеличивать длительность обезгаживания до 300 ч, либо повышать температуру;

– кислород и азот при реально используемых режимах обезгаживания удаляются практически только с поверхности деталей и узлов;

– для снижения процесса газовыделения можно рекомендовать использование специальных марок сталей, плавка которых осуществляется в вакууме.

Расчетная оценка влияния газовыделения на мощность генерации лазерной установки

Расчет влияния газовыделения примесей из металлических деталей проводился с помощью 3D модели непрерывного лазера на парах щелочного металла с поперечной диодной накачкой. Основные особенности модели заключаются в следующем. В модели заложен учет ненакачиваемых участков области с парами активных атомов и защитных буферных зон, как в направлении распространения лазерного излучения, так и в направлении распространения излучения накачки. Распространение и поглощение излучения накачки рассчитывается в соответствии с реальной экспериментальной схемой формирования и фокусировки ее пучка в активную область. Для этого разработана модель источника накачки, который представляет собой матрицу, собранную из диодных лазеров с волоконным выводом излучения. Расчет распространения лучей накачки ведется от волоконных выводов до конца активной области с учетом оптической схемы, формирующей каустику пучка накачки. Распространение излучения накачки в активной среде рассчитывается с учетом изменения ее спектрального состава в процессе поглощения в активной среде. Модель показала хорошее согласие с экспериментальными данными и может быть использована для оценки влияния газовыделения примесей из металлических деталей лазера на эффективность генерации лазерной системы.

В работе было рассмотрено два режима работы лазера: без нагрева рабочей среды ($20\text{ }^\circ\text{C}$) и режим работы лазера при нагреве до $150\text{ }^\circ\text{C}$.

Принимается, что кислород взаимодействуя с парами щелочного металла полностью удаляется, а влага удаляется при проведении процесса обезгаживания [4].

На рис. 3, 4 приведены результаты оценки влияния наличия в лазерном объеме H_2 (P_{H_2}) на мощность излучения генерации лазерной установки (P/P_0), где P – максимальная мощность излучения генерации лазерной установки; P_0 – мощность излучения генерации при различном давлении H_2 в лазерном объеме.

На рис. 4 показана зависимость нормированной на максимальное значение мощности генерации от времени выдержки при различной температуре.

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. В металлических деталях лазерной установки (12X18H10T, 370 кг, $4,8\text{ м}^2$) содержится значительное количество газообразных примесей ($O_2 - 8190\text{ см}^3$, $N_2 - 18860\text{ см}^3$, $H_2 - 28080\text{ см}^3$ при н.у.), которые могут попадать в рабочую среду.

2. Обезгаживание деталей в вакууме в диапазоне температур $350\dots 650\text{ }^\circ\text{C}$ позволяет практически полностью удалить водород ($350\text{ }^\circ\text{C} \sim 300$ ч, $450\text{ }^\circ\text{C} \sim 99$ ч, $550\text{ }^\circ\text{C} \sim 43$ ч, $650\text{ }^\circ\text{C} \sim 22$ ч). Кислород и азот при данном режиме обезгаживания удаляется только из поверхностного слоя в незначительных количествах ($\leq 1\%$).

3. Изменение состава газовой смеси при работе лазерной установки ($150\text{ }^\circ\text{C}$) может произойти в основном за счет газовыделения из металла водорода ($0,5$ суток – 3,41 торр, 40 суток – 30,5 торр),

а парциальные давления азота и кислорода при этом будут незначительны ($0,5$ суток – $1,5 \cdot 10^{-5}$ торр; $6,6 \cdot 10^{-3}$ торр, 40 суток – $1,3 \cdot 10^{-4}$ торр; $5,9 \cdot 10^{-2}$ торр соответственно). В режиме хранения лазерной установки (20 °С) газовыделение в течение $0,5 \dots 40$ суток уменьшается для H_2 , N_2 , O_2 ~ в 10 раз.

4. Используемый в настоящее время режим обезгаживания (350 °С, 70 ч, 10^{-5} торр) позволяет удалить из деталей ~ 49 % водорода, <1 % кислорода и азота и практически полностью влагу.

Для полного удаления водорода необходимо либо увеличить время обезгаживания до 300 ч, либо повысить температуру нагрева деталей до максимально допустимой величины не вызывающей изменения структуры металла и коробления деталей и сварных швов.

5. Расчетные оценки влияния газовыделения на эффективность генерации лазерной установки показывают, что независимо от температуры основным фактором снижения энергии генерации является газовыделение водорода, а газовыделение азота ввиду своей малости практически не сказывается на энергетике лазера. Кислород и влага практически не влияют на работу лазера, так как полностью удаляются из лазерного объема за счет окисления и предварительного обезгаживания.

При температуре 20 °С и времени выдержки 40 суток мощность излучения генерации E_2 – снижается на 12 %. При температуре 120 °С E_2 снижается на 14 % даже при времени выдержки $0,5$ суток.

6. В реальных условиях время непрерывной работы лазерной установки при температуре $120 \dots 150$ °С составляет ~ 10 мин в сутки и за 40 суток установка проработает в таком режиме ~ $0,3$ суток, что приведет к падению энергии генерации на уровне 15 %. Вследствие этого производить смену рабочей смеси необходимо не реже чем раз в $30 \dots 40$ суток.

7. Наиболее эффективно снизить влияние газовыделения на работу лазерной установки можно за счет использования в качестве конструкционных материалов специальных марок сталей, плавка которых осуществляется в вакууме.

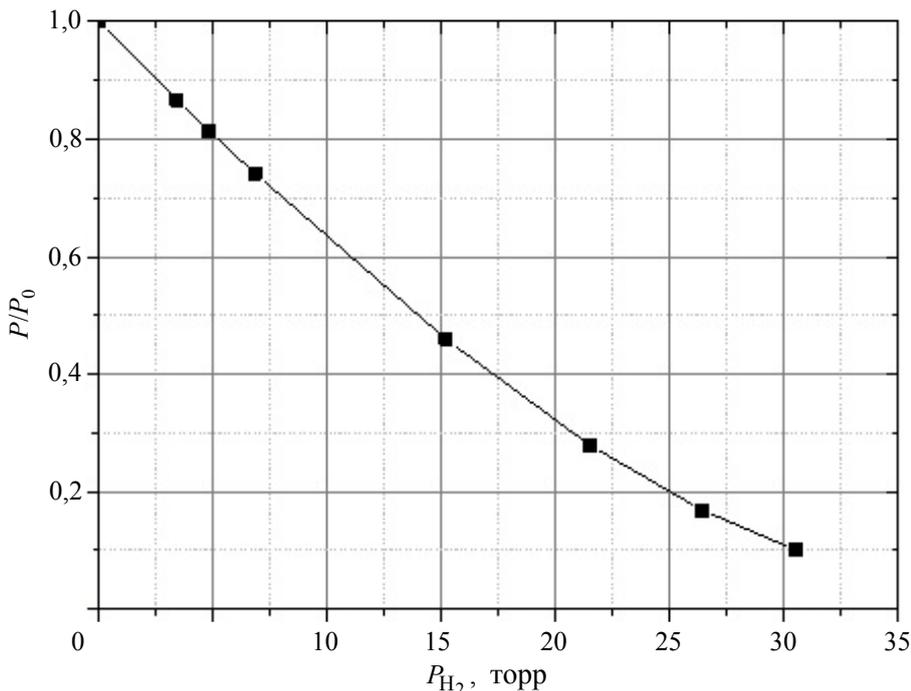


Рис. 3. Нормированная на максимальное значение мощность излучения генерации при различном давлении H_2

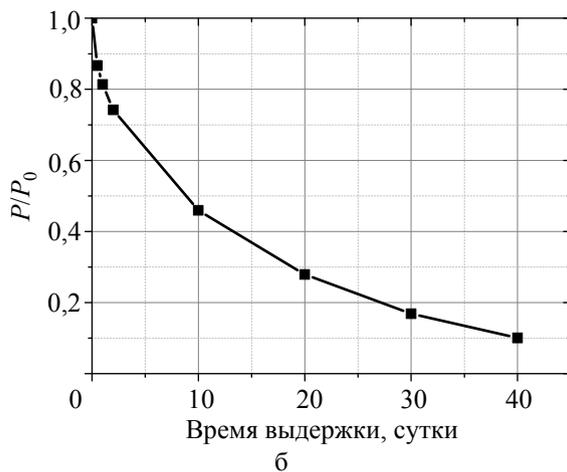
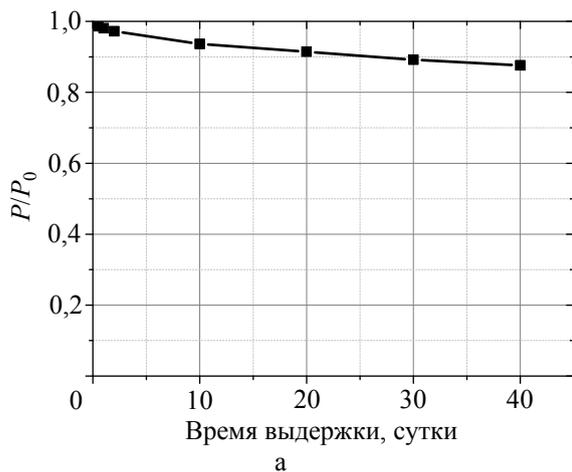


Рис. 4. Зависимость нормированной на максимальное значение мощности генерации от времени выдержки при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б)

Список литературы

1. Королев Б. И., Кузнецов В. И., Пипко А. И., Плисковский В. Я. Основы вакуумной техники. – М.: Энергия, 1975. 416 с.
2. Юрьева А. В. Расчет вакуумных систем: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 114 с.
3. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. – М.: Энергия, 1970. 504 с.
4. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. 366 с.