

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ДЕГРАДАЦИИ РАБОЧЕЙ СМЕСИ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

Л. М. Виноградский, Р. Ф. Имамов, В. Л. Мирошников, А. С. Шулаев

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

Введение

Для получения стабильных энергетических параметров лазерной установки с замкнутым циклом, необходимо обеспечить постоянство состава рабочей смеси (Р.С.) в течение заданного времени ее эксплуатации.

Возможными факторами загрязнения Р.С. может быть гажение смазочных материалов, используемых в металлических шарикоподшипниках нагнетателей, а также наличие вредных газообразных веществ (O_2 , N_2 , H_2) и твердых частиц материалов (пыль), которые присутствуют в исходных газообразных веществах и на внутренней поверхности лазерного объема и баллонов.

В данной работе представлены результаты следующих исследований:

- исследование смазочных материалов, используемых в составе подшипников;
- подготовка исходных газообразных веществ к работе и приготовление рабочих смесей.

1. Исследование смазочных материалов, используемых в составе подшипников

Ранее, были проведены тепловые испытания четырех видов смазок: № 158М, Arpezon AP101, Arpezon PFPE 501, ВНИИНП-284 («Аметист») в диапазоне температур $+100\div 250$ °С. Испытания проводились при нагреве в термощкафе, в котором размещался вакуумируемый контейнер ($p_{\text{ост.}} \leq 10^{-3}$ мм рт. ст.) с образцами смазок. Исследовалась испаряемость смазок (изменение веса) при ступенчатом нагреве в течение $\sim 5 \dots 7$ ч.

При ступенчатом нагреве в вакууме начало испаряемости смазки PFPE 501 было зафиксировано при температуре $+250^{-10}$ °С (0,96 %). Вязкость (эластичность) смазки сохранялась практически постоянной во всем диапазоне температур нагрева $+100\div 250$ °С (табл. 1.1).

В аналогичных условиях испытывались смазки российского производства ВНИИНП-284 («Аметист»), у которой основа масла также как и у PFPE 501 составляет перфторполиэфир (перфлуорполиэфир) и смазка AP101 на основе углеводородов.

Испытания смазки ВНИИНП-284 показали, что при ступенчатом (по 6 ч) нагреве до $+200$ °С, потеря веса (испаряемость) составляет ~ 50 %, что коррелирует с данными производителя смазки – испаряемость при $+200$ °С в течение одного часа не более 8 %. При этом было обнаружено, что при температуре 180 °С начинается образование твердых частиц, и эластичность смазки полностью теряется.

Смазка AP101 имеет худшие показатели по испаряемости и повышенную вязкость из исследуемых смазок. При 140 °С испаряемость смазки составила ~ 15 %, при 160 °С потеря веса составила ~ 36 %, также наблюдалось пожелтение, растрескивание после остывания и загустение. При дальнейшем повышении температуры смазка полностью затвердела при 200 °С. Вследствие этого возможность использования смазки AP101 в подшипниках не рассматривалась.

По результатам проведенных исследований было принято решение испытать смазку PFPE 501 в составе подшипников с нагревом и без нагрева на стенде (рис. 1.1). Испытания проводились в два цикла, в каждом из которых работы выполняются в два этапа. В первом цикле (I) испытывается смазка PFPE 501, которая предварительно не подвергалась обработке (новая). Во втором цикле (II)

использовалась смазка, которая прошла ступенчатый нагрев (по 6 ч) при температурах $+100\div 250$ °С. На первом этапе работы выполняются при комнатной температуре ($18\div 20$ °С), а на втором этапе проводился нагрев подшипника с помощью нагревательных приборов до 150 °С. Во время испытаний проводилось снятие частотных характеристик каждые 30 минут с помощью прибора «Балком-1». Частота вращения подшипников составляла ~ 2000 об/мин.

Таблица 1.1

Результаты тепловых испытаний смазок

Наименование, тип смазки	№ образца	Исходный вес, гр	Изменение веса смазки в гр/% абс. при нагреве в течение 6 ч при t , °С								
			100	120	140	160	180	200	220	250	
APIEZON PFPE 501	1	4,82	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	-0,06/ -1,24	
	2	4,43	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	-0,03/ -0,68	
	%		0	0	0	0	0	0	0	0	-0,96
	Σ %		0	0	0	0	0	0	0	0	-0,96
APIEZON AP101	3	1,90	–	-0,10/ -5,26	-0,18/ -14,73	-0,37/ -34,21	-0,35/ -52,63	-0,19/ -62,63	–	–	
	4	2,04	–	-0,13/ -6,37	-0,18/ -15,2	-0,46/ -37,75	-0,33/ -53,92	-0,18/ -62,75	-0,09/ -67,16	–	
	%		–	-5,82	-9,15	-21,01	-17,3	-9,41	-4,47	–	
	Σ %		–	-5,82	-14,97	-35,98	-53,28	-62,69	-67,16	–	
ВНИИ НП-284 «Аметист»	5	1,78	-0,11/ -6,18	-0,07/ -10,11	-0,10/ -15,73	-0,20/ -26,97	-0,21/ -38,76	-0,19/ -49,44	-0,15/ -57,87	–	
	6	1,24	-0,07/ -5,65	-0,06/ -10,48	-0,08/ -16,94	-0,15/ -29,03	-0,14/ -40,32	-0,13/ -50,81	–	–	
	%		-5,92	-4,38	-6,04	-11,66	-11,54	-10,59	-7,74	–	
	Σ %		-5,92	-10,30	-16,34	-28,0	-39,54	-50,13	-57,87	–	

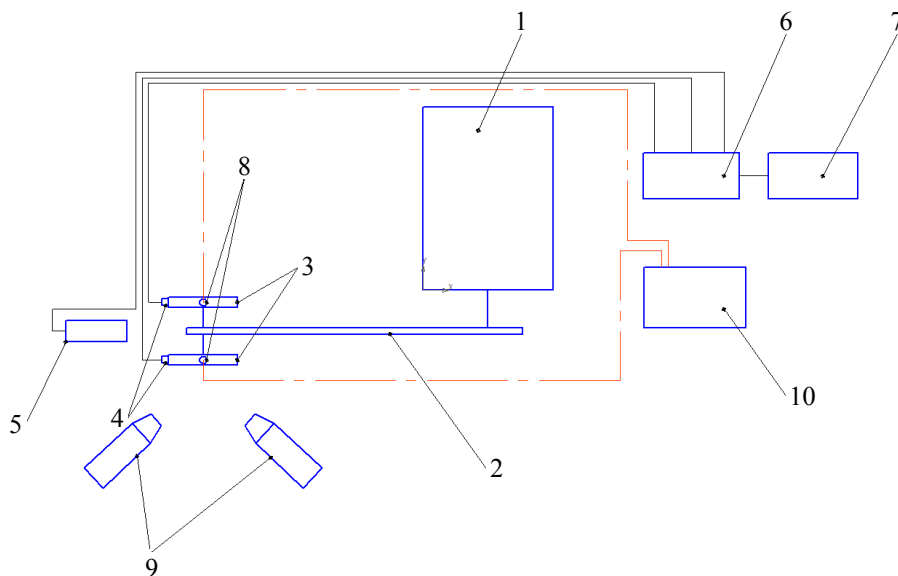


Рис. 1.1. Схема стенда испытания смазок подшипников: 1 – электродвигатель; 2 – ременный привод; 3 – корпуса с установленными в них подшипниками; 4 – датчики вибрации (акселерометры); 5 – тахометр; 6 – измерительный блок; 7 – ноутбук; 8 – термопары; 9 – нагревательные приборы (фены); 10 – измеритель температуры

Как следует из результатов измерения виброскоростей (мм/с), на различных этапах испытаний стабильная работа подшипников со смазкой PFPE 501 наблюдается как без нагрева (18...20 °С), так и с нагревом до ~150 °С [1]. Типовая частотная характеристика приведена на рис. 1.2.

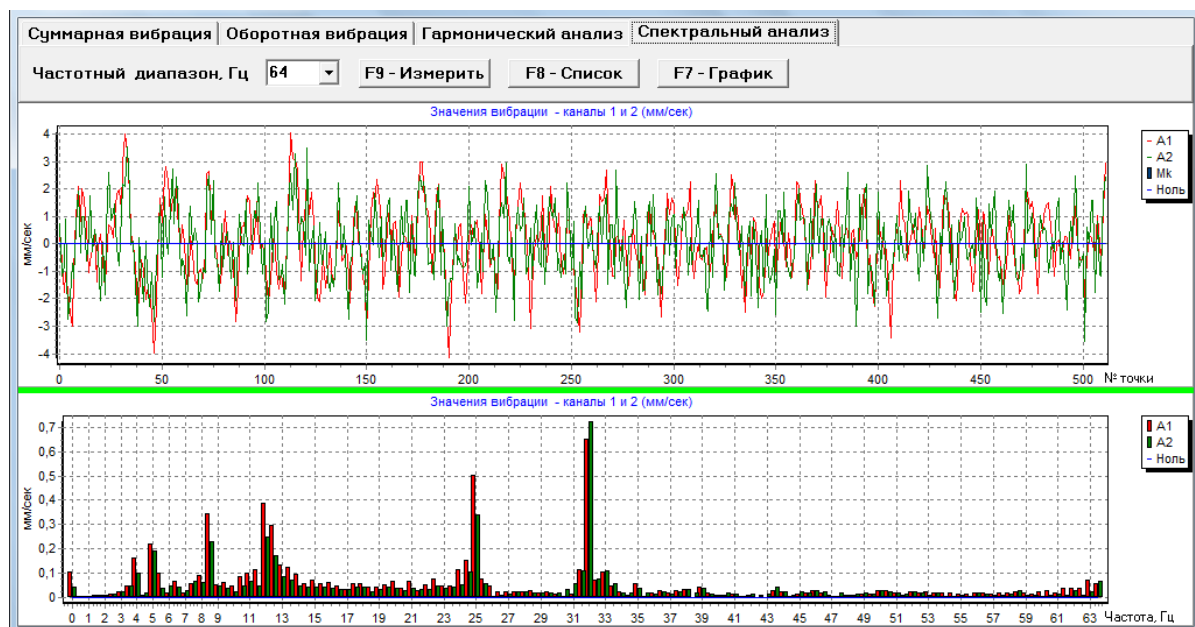


Рис. 1.2. Типовая частотная характеристика в начальный момент вращения

Резонансных явлений ни на одной из фиксируемых прибором «Балком-1» частот не обнаружено (33 Гц – частота вращения вала, 25 Гц – частота вращения электродвигателя). Зафиксированы небольшие колебания (0,25–0,5 мм/с) на частоте 12 Гц при работе подшипников без нагрева (табл. 1.2), которые исчезают через несколько минут после начала вращения (< 2 мин). Возникновение дополнительных колебаний объясняется тем, что при низких температурах (15...25 °С) согласно паспортным данным в начале вращения подшипника крутящий момент в $\approx 2,5$ раза выше, чем при последующем вращении (начало вращения – 162,3 г·см и вращение – 64,4 г·см).

Таблица 1.2

Результаты испытаний подшипников со смазкой PFPE 501 без нагрева

Время	Температура, °С		Частота вращ., об/мин	Виброскорость (мм/сек) на частотах (Гц):					
				12±1		25±1		33±1	
	1й подш.	2й подш.		1й подш.	2й подш.	1й подш.	2й подш.		
8:22	18	18	1940	0,4	0,25	0,5	0,35	0,65	0,71
8:24	22	21	1960			0,5	0,3	1	1
8:59	40	36	1970			0,5		1,5	1,3
9:26	35	37	1990			0,5	0,4	1,6	1,3
9:58	35	39	2010			0,5	0,4	1,7	1,3
10:28	36	38	2010			0,5	0,5	1,9	1,6
10:55	37	37	2020			0,5	0,5	1,6	1,5
11:25	35	37	2020			0,5	0,4	1,6	1,1
Среднее значение						0,5	0,39±25 %	1,5±30 %	1,25±20 %

Для определения предельных возможностей температурные испытания со смазкой PFPE 501 были продолжены в диапазоне $250^{+10} \div 300 \pm 5$ °С.

Результаты исследований показали, что при нагреве смазки до 250^{+10} °С в течение 6 ч потеря веса (испаряемость) составляет 11,6÷14,9 %. При повторном нагреве смазки до 250^{+10} °С испаряемость уменьшается до 0,4÷0,7 %. Данное свойство смазки, которое обусловлено наличием легкоки-

пящих разжижителей, можно использовать для предварительного обезгаживания смазки PFPE-501 при температуре ≈ 260 °С перед закладкой в подшипники. Экспериментально (визуальный осмотр) подтверждено, что вязкость смазки при данном режиме нагрева (250^{+10} °С, 6 ч) практически не изменилась.

При дальнейшем нагреве до 275 °С в течение 6 ч испаряемость смазки составила $4,9 \div 7,6$ %, и произошло ее незначительное загустение. Увеличение нагрева смазки до 300 °С в течение 6 ч привело к ее загустению до состояния «пластилина» и пожелтению, что дает основание считать смазку потерявшей свою работоспособность.

На основе проведенных комплексных исследований можно сделать следующие выводы:

- смазка на основе перфторполиэфира PFPE 501 работоспособна в составе подшипников в диапазоне температур $+15 \div 250$ °С;

- в рабочем диапазоне температур (≤ 250 °С) испаряемость смазки составляет не более 1,0 % за 6 ч;

- при увеличении температуры нагрева свыше 250^{+10} °С гажение смазки увеличивается до $\approx 13,4$ %;

- при температуре нагрева ≈ 275 °С смазка начинает густеть и при температуре 300 °С смазка густеет до состояния «пластилина», т. е. теряет свою работоспособность;

- для уменьшения процесса гажения смазку перед заполнением в подшипники необходимо обезгазить при температуре ≈ 260 °С в вакууме в течение не менее 6 ч;

- смазка PFPE 501 испытана на стенде в составе металлических шарикоподшипников при скорости вращения ≈ 2000 об/мин и температурах $18 \div 20$ °С и 150 °С. Частотные характеристики, полученные при проведении испытаний, подтверждают стабильную работу подшипников со смазкой PFPE 501;

- смазка PFPE 501 наиболее стабильно работает при повышенных температурах (>15 °С). При температурах ниже 15 °С могут наблюдаться дополнительные колебания конструкции в начальный момент вращения. Это объясняется повышенной вязкостью смазки при начале вращения подшипника;

- при испытаниях в непроточном макете лазерной установки при температуре ≈ 130 °С получены пары щелочного металла и не отмечено взаимодействия смазки с парами металла (визуально);

- необходимо провести испытания смазки в составе шарикоподшипников при работе реальной лазерной установки;

- испытания смазки ВНИИНП-284 («Аметист») показали, что при температуре свыше 100 °С наблюдается интенсивное гажение и при температурах $180 \div 200$ °С смазка переходит в твердое состояние аналогичное по виду парафину. Наиболее оптимально использовать смазку «Аметист» в подшипниках при температуре до 100 °С;

- сравнение поведения трех видов смазки (№ 158М, PFPE 501, AP101) при нагреве в диапазоне $100 \div 300$ °С показывает, что все они в различной мере загрязняют рабочую среду лазерной установки (табл. 1.3);

- изучать процессы взаимодействия продуктов гажения смазки с рабочей средой при работе лазерной установки является сложной задачей и наиболее оптимальным вариантом будет использование бессмазочных подшипников (керамических, скольжения и т. д.).

Таблица 1.3

Сравнение поведения трех видов смазок при нагреве

Температура, °С	Испаряемость смазки, %		
	№ 158М	ВНИИНП-284	PFPE 501
100		6	–
160	12,8	10,3	–
180	28,5	39,5	–
200	45,6	50,13	–
220	–	57,9	–
250	–	–	При $t = 250^{-10}$ °С – 1,0 При $t = 250^{+10}$ °С – 13,4
275	–	–	~ 20

2. Подготовка исходных газообразных веществ к работе и приготовление рабочих смесей (Р.С.)

Одним из факторов, влияющих на стабильность состава Р.С., является попадание в газовую среду лазера вредных примесей из исходных газов, внутреннего объема баллона и лазера. Для уменьшения количества вредных примесей, обусловленных исходными газами, при проведении газотехнологических операций используются газы, приведенные в табл. 2.1. Кроме того, газообразные вещества расфасовываются в специальные баллоны типа Vitkovice (Чехия), имеющих чистую внутреннюю поверхность, что значительно уменьшает запыленность газовой среды и десорбцию вредных примесей (O_2 , N_2 , H_2O) из металла. Чистые газообразные вещества напускаются в лазерный объем, который предварительно проходит очистку и обезгаживание от примесей, что позволяет приготовить рабочую смесь лазера с минимальным содержанием вредных примесей (газообразные, твердые) [2].

Таблица 2.1

Основные характеристики газов

№ п/п	Наименование	ТУ, ГОСТ	Содержание основного вещества, %	Примечание
1	Аргон	ТУ 2114-006-45905715-2010	99,9995	Марка 5,5
2	Гелий-4	ТУ 0271-001-45905715-2010	99,9999	Марка 6,0
3	Азот	ТУ 2114-009-45905715-2011 ГОСТ 9293-74	99,9999	6,0

Перед использованием все газообразные вещества анализируются на содержание кислорода, влаги (He^4 , N_2 , Ar) и азота (He^4). Содержание кислорода и азота в He^4 определяется на хроматографе «Цвет-800» с детекторами по теплопроводности в изотермических режимах с использованием газохроматографической методики. К работе допускается гелий с содержанием кислорода и азота $\leq 10^{-3}\%$ об. каждого наименования. Как показали результаты анализов, содержание N_2 и O_2 в используемых в экспериментах газах находится ниже предела обнаружения (ПО) $\leq 10^{-3}\%$ об.

Содержание влаги в газах (He, N_2 , Ar) измеряется с помощью прибора ИВГ-1, а кислорода (Ar, N_2) с использованием газоанализатора Флюорит-Ц. Измерения содержания пыли в баллонах различных типов проводились с использованием прибора типа АЗ-10. Полученные усредненные по трем измерениям концентрации (частиц/л) приведены в табл. 2.2.

Как показали результаты исследований, в баллонах, изготовленных по ГОСТ 949-73, концентрация кислорода и азота в течение 10 дней после заполнения особо чистым газом увеличивается более чем в 10 раз. Кроме того за счет грязной внутренней поверхности (ржавчина, окалина) на выходе газа из баллона ГОСТ 949-73 наблюдается повышенное содержание пыли, что при использовании их в работе может привести к загрязнению лазерной кюветы (оптика, внутренняя поверхность).

Таблица 2.2

Сравнение содержания пыли в двух баллонах с азотом

Диапазон измерения размера частиц, мкм	Концентрация пыли в баллонах, частиц/л	
	Баллон № 33872	«Vitkovice» № LA4-085
0,3–0,4	70	0
0,4–0,5	10	0
0,5–1	10	0
1–2	0	0
2–5	0	0
>5	0	0

Перед сборкой детали ЛУ подвергаются очистке химическими методами для удаления поверхностной окисной пленки или других загрязняющих веществ. Затем детали обезгаживаются в условиях вакуума при температуре, ограниченной возможной деформацией деталей (пределом

ползучести). Время обезгаживания в печи в реальных условиях принимается ≈ 70 ч. Суммарная температура нагрева принимается на уровне $t = 350$ °С

Описанными методами скорость газовыделения после обработки металла в вакуумной установке (обезгаживание) может быть снижена на несколько порядков [3].

Для исключения возникновения избыточных напряжений в металле, которые могут привести к структурным разрушениям, рекомендуют ограничивать скорость нагрева до температуры отжига на уровне 45 мин на каждые 2,5 см толщины детали [4].

После окончания процесса обезгаживания печь вскрывается, детали упаковываются в полиэтиленовые мешки, которые заполняются аргоном для уменьшения контакта с воздухом, и весь комплект отправляется на сборочный участок для монтажа лазерной установки. В процессе сборки каждая деталь обдувается чистым газом (Ar, N₂) для удаления пыли с их поверхности и работа ведется в чистом помещении.

После завершения сборки лазерной установки производится продувка внутреннего объема лазера с использованием аттестованных газообразных веществ (N₂, Ar). Продувка производится с использованием блока очистки в соответствии с регламентом. Эффективность продувки контролируется анализатором запыленности АЗ-10, установленном на выходе из лазерного объема. После удаления из внутреннего объема твердых частиц продувка прекращается и с помощью течеискателя ASM-310 ЛУ проверяется на вакуумную плотность. После установления отсутствия в ЛУ течей на уровне $Q < 1 \cdot 10^{-7}$ л-торр/с производится монтаж нагревательных элементов и согласно КД на изделие выполняется цикл обезгаживания внутреннего объема лазера с одновременным нагревом в диапазоне $t = 120 \dots 160$ °С и вакуумировании до $P_{\text{ост.}} \leq 10^{-3}$ мм рт. ст. Вакуумирование лазерного объема до $P_{\text{ост.}} \leq 10^{-3}$ мм рт. ст. производится с использованием вакуумного поста, включающего в свой состав форвакуумный и турбомолекулярный насосы, азотную ловушку, приборы контроля остаточного давления (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Внешний вид вакуумного поста

После достижения во внутреннем объеме лазера заданного уровня гажения (повышения давления не более чем на $P = 5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. за время 10 мин при отсутствии откачки), лазерный объем охлаждается до комнатной температуры и проводится проверка конструкции на вакуумную плотность с использованием течеискателя ASM-310, чувствительность которого равна

$Q \leq 1 \cdot 10^{-7}$ л·торр/с. Далее выполняется проверка конструкции на прочность при $P = 6$ атм (выдержка 10 мин). После этого проводится технологическая операция по приготовлению рабочей смеси на основе He^4 .

Приготовление рабочей смеси на основе He^4 производится в следующей последовательности. При постоянной продувке аргоном в лазерный объем загружается рабочее вещество. После этого лазерный объем подвергается трехкратной промывке гелием и вакуумируется до $P_{\text{ост.}} \leq 10^{-3}$ мм рт. ст. Далее в лазерный объем с напаренным рабочим веществом напускается гелий до заданного уровня избыточного давления.

Для напуска гелия (He^4) согласно техническому заданию разработан и изготовлен передвижной газотехнологический пост (ПГТП) (рис. 2.3), который включает в свой состав баллоны (10 л) с He^4 и аргоном, вакуумное оборудование, запорную арматуру, приборы контроля давления, фильтры грубой и тонкой очистки.



Рис. 2.3. Внешний вид ПГТП

При отработке ПГТП проводились измерения качества газообразных веществ на входе в лазерное устройство. Как показали газохроматографические измерения, состав исходного газа (He , Ar) на выходе из ПГТП соответствовал чистоте газа в баллоне. Также проводился контроль запыленности газовой среды с использованием анализатора запыленности АЗ-10 на выходе из ПГТП.

Как показали результаты измерений, фильтры грубой и тонкой очистки эффективно удаляют частицы размером свыше 0,3 мкм, которые могут быть в баллонах, трубопроводах и арматуре ПГТП.

Дальнейшее использование ПГТП для работы с лазерной установкой показали его надежные эксплуатационные характеристики.

В процессе эксплуатации лазерной установки проводится отбор проб газовой смеси из внутреннего объема лазера, которые анализировались методом газовой хроматографии на содержание кислорода и азота [5]. Результаты анализов приведены в табл. 2.3.

Как следует из полученных результатов в газовой смеси происходит увеличение содержания азота и кислорода в пропорциях, не связанных с натеканием из атмосферы. Вероятно, увеличение примесей связано с гажением из металлических деталей лазера.

Содержание примесей (O_2 , N_2) в газовой смеси

Дата	Наименование	Давление, атм	Содержание примесей, % об.	
			O_2	N_2
05.02.2016	Усилитель (проба № 1)	7	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
	Генератор (проба № 1)	3,5	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
	Генератор (проба № 2)	3,5	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
15.02.2016	Усилитель (проба № 1)	3,5	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
	Усилитель (проба № 2)	3,5	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
14.03.2016	Генератор (проба № 1)	3,3	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
	Генератор (проба № 2)	3,3	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$
23.03.2016	Усилитель (проба № 1)	4	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
	Генератор (проба № 1)	4	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$

На основе вышеприведенных экспериментальных данных можно сделать вывод, что для обеспечения стабильных параметров лазерной среды необходимо выполнять следующий перечень газотехнологических операций:

1. проведение аттестации исходных газообразных веществ в баллонах (He^4 , Ar, N_2) на содержание газообразных и твердых примесей;
2. выполнение технологической операции химической очистки и последующей промывки и сушки изделий согласно КД;
3. проведение обезгаживания в вакууме с нагревом деталей и узлов лазерной установки ($P_{осм.} \leq 10^{-5}$ мм рт. ст., $t = 350$ °С в течение 70...300 ч);
4. транспортировка деталей и узлов в специальном герметизированном контейнере в среде аргона к месту сборки лазерной установки;
5. обдувка деталей и узлов газом (Ar, N_2) перед сборкой лазерной установки и последующая очистка внутреннего объема лазера от пыли согласно регламенту;
6. обезгаживание внутреннего объема лазера в сборе согласно КД;
7. проверка вакуумной плотности и герметичности лазерной установки на всех этапах подготовки установки к работе;
8. загрузка рабочего вещества в лазерную установку при постоянной продувке инертным газом – аргоном высокой чистоты (марка 5,5) и вакуумирование Л.У., напарение рабочего вещества;
9. заполнение лазерного объема He^4 с использованием ПГТП до заданного уровня давления;
10. необходимо проводить постоянный контроль состояния фильтрующих элементов грубой и финишной очистки на передвижных постах, а также состава исходных газов и рабочей смеси в процессе работы лазерной установки.

Список литературы

1. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М.: Наука, 1996. 276 с.
2. Розанов Л. Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов по спец. «Вакуумная техника». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. 320 с.: ил.
3. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 366 с., ил.
4. Дальский А. М., Арутюнова И. А., Барсукова Т. М. Технология конструкционных материалов. Учебник для машиностроительных специальностей вузов / Под общ. ред. Дальского, М.: Машиностроение, 1985. 448 с.
5. Пецев Н., Коцев Н. Справочник по газовой хроматографии: Пер. с болг. – М.: Наука, 1996. 276 с.