

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. Королева

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГАЗОВЫХ
И ЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ
ПОСРЕДСТВОМ
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СРЕД
И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методические указания

САМАРА 1996

УДК 621. 452

Визуализация газовых и жидкостных течений посредством люминесцентных сред и лазерного излучения: Метод. указания / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. *Н. Д. Быстров, О. А. Левченко, Л. Н. Мединская, Г. Ю. Быков.* Самара, 1996. 28 с.

Рассмотрены физические основы метода визуализации течений газов и жидкостей в элементах энергетических установок, базирующегося на применении люминесцентных веществ, вводимых в визуализируемый поток, и источника световой энергии, в роли которого предлагается применять газовый азотный лазер, генерирующий излучение в ультрафиолетовой области спектра на длине волны 0,337 мкм.

Рассматриваемый метод практически реализован на специальной установке, позволяющей получать конкретные результаты по визуализации газожидкостных течений.

Практическое освоение предлагаемого метода базируется на ознакомлении с правилами эксплуатации экспериментальной установки и с основами безопасной эксплуатации N_2 -излучателя.

Предлагаемый метод является альтернативным по отношению к широко известному и хорошо себя зарекомендовавшему методу лазерного «ножа», основанному на использовании, как правило, источников излучения, видимого для человеческого глаза.

Авторы-составители выражают благодарность инженеру Г. А. К и р е е в у и канд. техн. наук А. Л. М у р к и н у за техническую реализацию данной лабораторной работы на экспериментально-учебном оборудовании кафедры АСЭУ.

Подготовлены на кафедре АСЭУ.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева

Рецензенты: *Н. Ф. Мусаткин, Е. В. Шахматов.*

СОДЕРЖАНИЕ

В В Е Д Е Н И Е	4
1. Физические основы метода визуализации газожидкостных потоков люминесцентными средами	5
2. Состав установки по визуализации газожидкостных течений, правила эксплуатации установки и ее элементов	13
2.1. Структура установки и ее конструктивные особенности	13
2.2. Азотный лазер. Основные параметры и экспериментальные характеристики ...	16
2.3. Основные приемы эксплуатации опытной установки. Правила безопасной эксплуатации	21
3. Рекомендуемая последовательность проведения эксперимента по визуализации течений газожидкостных сред	24
С п и с о к и с п о л ь з о в а н н о й л и т е р а т у р ы	28

ВВЕДЕНИЕ

Известный метод визуализации структур течений газовых и жидкостных сред, основанный на методе плоского светового сечения, обладает рядом недостатков. Наиболее серьезный состоит в том, что применение этого метода существенно ограничено в замкнутых объемах узлов энергоустановок, обладающих стенками, хорошо отражающими световое излучение. Это приводит к появлению дополнительного светового фона и существенно снижает диагностические возможности метода светового сечения или метода лазерного "ножа".

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, проводимые в НТЦ АвтоВАЗа, НИИ Дизелестроения, на Алтайском моторном заводе позволяют считать, что диагностические методы оценки структур газовых и жидкостных потоков в элементах двигателей и других энергоустановок с помощью лазерного (светового) «ножа» по-прежнему являются наиболее информативными, обладают внедряемостью и не вносят существенных возмущений в диагностируемые процессы.

В связи с этим, метод диагностики, заключающийся в визуализации структур течений газов и жидкостей на основе люминесцентных сред и лазерного излучения, может рассматриваться как новый эффективный перспективный инструмент в арсенале исследовательских средств отечественного двигателестроения. Широкое внедрение рассматриваемого метода в практике энергомашиностроения может последовать лишь за комплексом вспомогательных исследований, детализирующих отдельные технологические моменты метода, который в силу своей новизны разработан на данный момент в ряде аспектов лишь фрагментарно.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ СРЕДАМИ

Структуру течений можно получить, применяя люминесцентные вещества. Подобное решение данной задачи рассматривалось в работе [1], где изучалась визуализация поля скоростей в потоке газа с применением жидкого фосфоресцирующего вещества — диацетила. Сложность этого метода заключается в слабом свечении диацетила. Этот вопрос можно решить при помощи порошкообразных кристаллофосфоров, обладающих более ярким свечением. Среди люминесцирующих веществ кристаллофосфоры выделяются обычно своим длительным послесвечением. Оно обусловлено наличием ничтожных количеств посторонней примеси (чаще всего тяжелых металлов) или дефектов кристаллической решетки. Посторонняя примесь или дефект решетки вместе с ближайшими ионами (или атомами) основного вещества являются тем образованием, именуемым центром люминесценции, которое определяет спектр излучения. При возбуждении, как правило, происходит ионизация центров свечения. Возникающие при этом свободные электроны временно захватываются (локализуются) в основном веществе фосфора, в так называемых местах захвата (или иначе — в ловушках). Наличие ловушек и является причиной длительного послесвечения возбужденных кристаллофосфоров.

Благодаря в основном рекомбинационному характеру механизм свечения кристаллофосфоров очень сложен. Вследствие разделения зарядов при возбуждении кинетика свечения фосфоров, как правило, оказывается нелинейной. При возбуждении возникает равная концентрация n разделенных зарядов — электронов и ионизованных центров. Если при этом предположить вероятность рекомбинаций электрона с ионизованными центрами пропорциональной их числу, то при затухании число рекомбинаций в единице объема в единицу времени

$$\frac{dn}{dt} = -pn^2, \quad (1)$$

где t — время и p — некоторая постоянная.

Во время возбуждения среды процесс осложняется тем, что кроме рекомбинации ионизованных центров происходит также нарастание их числа вследствие возбуждения. Тогда уравнение (1)

примет вид

$$\frac{dn}{dv} = -pn^2 + \chi E, \quad (2)$$

где v — время от начала действия возбуждающего света и χ — некоторая постоянная, пропорциональная коэффициенту поглощения возбуждающего света.

Интегрируя (2), получим

$$n = \sqrt{\frac{\chi E}{p}} \frac{1 - e^{-2\sqrt{\chi E p} v}}{1 + e^{-2\sqrt{\chi E p} v}}. \quad (3)$$

Так как интенсивность пропорциональна числу актов рекомбинаций, то пренебрегая коэффициентом пропорциональности, можно положить: $I = pn^2$. Тогда

$$I = \chi E \left(\frac{1 - e^{-2\sqrt{\chi E p} v}}{1 + e^{-2\sqrt{\chi E p} v}} \right)^2. \quad (4)$$

Если длительность возбуждения настолько мала, что $v \ll \frac{1}{\sqrt{\chi E p}}$,

то из (4) следует, что

$$n = \chi E v \quad \text{и} \quad I = p(\chi E v)^2. \quad (5)$$

Таким образом, при кратковременном возбуждении яркость свечения I вначале пропорциональна квадрату интенсивности E возбуждающего света и квадрату длительности возбуждения v_0 ,

$$\text{т. е. } I_0 \sim E^2. \quad (6)$$

Однако на опыте все же начальная яркость фосфоресценции не всегда оказывается пропорциональной E^2 , иногда

$$I_0 \sim E. \quad (7)$$

Такая зависимость была получена в работе Е. С. Крыловой [2] для фосфора ZnS при слабом кратковременном возбуждении. При более интенсивном возбуждении фосфора ZnS уже имеет место четкая квадратичная зависимость I_0 от E . Аналогичная картина получается при увеличении длительности возбуждения v .

Данное решение рассмотрено для фосфора, имеющего один

сорт ловушек. Реальный фосфор имеет несколько сортов ловушек, и решение в общем виде этой задачи практически невозможно из-за своей сложности.

Упрощению задачи способствуют следующие экспериментальные факты [3].

1. Кривые термического высвечивания возбужденных фосфоров при равномерном их нагревании, особенно если возбуждение производилось при низких температурах, в большинстве случаев обладают рядом максимумов. Обычно эти максимумы хорошо разделены, что указывает на какую-то определенную последовательность высвобождения дополненных ловушек. Это явление может быть интерпретировано так.

Сначала освобождаются в основном заряды с самых мелких ловушек, затем с более глубоких и т. д., пока не опустошатся все ловушки. При этом высвобождение дырок обычно не приводит к появлению пиков на кривой термического высвечивания, так как рекомбинация свободных дырок с локализованными электронами в большинстве исследованных случаев безызлучательна. Поэтому уход дырок с уровней (центров свечения) определенного сорта может привести к полному исчезновению в сложном спектре фосфора, если в нем имеются центры свечения разных сортов соответствующей полосы излучения (внешние тушение).

2. Даже при очень интенсивном возбуждении ловушки заполняются лишь частично: мелкие — из-за большой вероятности термического выброса локализованных зарядов, глубокие — из-за высвечивающего действия возбуждающего света, заключающегося в том, что сам возбуждающий свет может высвобождать локализованные заряды. Таким образом, имеются основания считать, что малая заполненность ловушек получается, по-видимому, в большинстве случаев, особенно если возбуждение было кратковременным или не очень интенсивным.

3. Точно так же можно считать, что вероятность рекомбинации свободных зарядов чаще всего заметно меньше вероятности их повторной локализации [4].

4. При кратковременном возбуждении распределение зарядов по ловушкам будет резко температурно неравномерным, так как локализация зарядов будет происходить соответственно эффективным сечениям захвата ловушек. Аналогичная картина будет и при длительном возбуждении, так как возбуждающий свет (при длительном его действии) препятствует равновесному заполнению

ловушек (высвечивающее действие возбуждающего света), особенно глубоких. В обоих этих крайних случаях, а следовательно, и во всех промежуточных можно ожидать, что более глубокие ловушки окажутся значительно более обедненными, чем в случае температурно-равновесного распределения.

Указанные факты, которые следует рассматривать отнюдь не как исключительные, позволяют нарисовать следующую картину (рис. 1):

$$\frac{dn_i^+}{dt} = \omega_i^+ n_i^+ - \sigma_{oi}^- n_i^+ U^- N^- + \sigma^+ (v_i^+ - n_i^+) U^+ N^+, \quad (8)$$

$$\frac{dn_i^-}{dt} = \omega_i^- n_i^- - \sigma_{oi}^+ n_i^- U^+ N^+ + \sigma_i^- (v_i^- - n_i^-) U^- N^-, \quad (9)$$

где

$$U^\mp N^\mp = \frac{\sum_1^{m^\mp} \omega_k^\mp n_k^\mp}{\sum_1^{m^\mp} \sigma_{ok}^\mp n_k^\mp + \sum_1^{m^\mp} \sigma_k^\mp (v_k^\mp - n_k^\mp)}, \quad (10)$$

n_i — концентрация локализованных зарядов i -го сорта; N — концентрация свободных зарядов; v_i — концентрация ловушек i -го сорта; σ_{oi} — эффективное сечение рекомбинации свободных зарядов с локализованными зарядами i -го сорта; σ_i — эффективное сечение захвата свободных зарядов ловушками i -го сорта; U — скорость свободных зарядов и m — число сортов ловушек (нумерация — в порядке нарастания их глубины).

Так как фосфор в целом нейтрален, то алгебраическая сумма распределенных в результате возбуждения зарядов должна равняться нулю, т. е.

$$\sum_1^m n_k^- - \sum_1^m n_k^+ = 0. \quad (11)$$

При наличии (11) одно из уравнений (8) или (9) оказывается лишним.

Будем считать, что фосфоресценция может возникать лишь в результате рекомбинации свободных электронов с локализован-

ными дырками. Тогда интенсивность свечения (в числах излученных квантов), возникающая в результате рекомбинации свободных электронов с ионизированными центрами свечения i -го сорта, равна:

$$I_i = q_i^* \sigma_{oi}^- n_i^+ U^- n^- N^-, \quad q_i^* \leq 1, \quad (12)$$

q_i^* — вероятность излучения при рекомбинации.

Введем величину

$$x^- = \frac{U^- N^-}{E} \quad (13)$$

и приведем формулу (12) к виду

$$\frac{I_i}{q_i^* E} = \sigma_{oi}^- n_i^+ x^-. \quad (14)$$

Поскольку величины n_i^+ и x^- при разных E претерпевают небольшие изменения, то и изменение величины

$I_i / q_i^* E$ (имеющей смысл величины, пропорциональной выводу рекомбинации свободных электронов с ионизированными центрами свечения i -го сорта) тоже не будет резким.

• Рассмотрим теперь вопросы, связанные с другими свойствами люминофоров.

Как правило, средний размер кристаллов люминофоров находится в пределах 5-10 мкм. Исследования, проведенные с помощью электронного микроскопа [5], показали, что применяемый для синтеза порошок сульфида цинка состоит из отдельных округлых агломератов размером 1 мкм, которые, в свою очередь, состоят из иглообразных

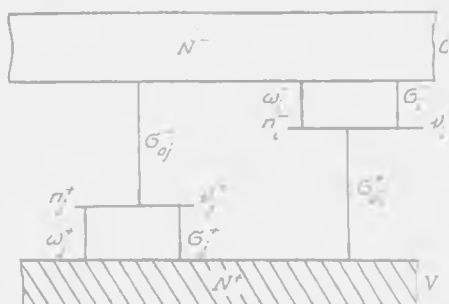


Рис. 1. Зонная модель фосфора с центрами свечения и ловушками нескольких сортов в режиме естественного затухания: V — валентная зона; C — зона проводимости v^+ ; и v^- — концентрации центров свечения и электронных ловушек; n^+ и n^- — концентрации ионизированных центров свечения и локализованных электронов; N^+ и N^- — концентрации свободных дырок и электронов; σ_0^+ и σ_0^- — эффективные сечения рекомбинации свободных дырок и электронов; σ^+ и σ^- — эффективные сечения захвата свободных дырок и электронов. Стрелки указывают на электронные переходы; индекс j — относится к центрам свечения j -го сорта; индекс i — к электронным ловушкам i -го сорта

частиц длиной около 100 \AA . Таким образом, частицы ZnS по существу представляют собой одномерные зародыши кристаллов. У них нет четкой кристаллической структуры.

При прокаливании порошков при определенной температуре в течение 15-30 мин [6] получают кристаллофосфоры. Из табл. 1 можно видеть, что диаметр и объем кристаллов зависит в большей степени от температуры кристаллизации. От этого же параметра сильно зависит и световая сумма фосфоров (рис.2).

Т а б л и ц а 1.

Параметры некоторых промышленных кристаллофосфоров

№	Марка порошка	Хим. состав	Спектр возбуждения, нм	Область люминесценции	Время люминесценции	Размеры частиц, мкм
1	ФВ-540	$ZnS-Cu$	365	зеленая	1 мин	1-5
2	Л-15	$ZnS-CdS$	40-400	желтая	1 мин и больше	10-20
3	N 39	$Ca, BrS-Bi, Cu$	40-400	синяя	> 1 мин	10-20
4	N 40	Ca, Bi, Cu	40-400	синяя	> 1 мин	10-20
5	ФД-630	$Ca S, SrS-Cu$	40-400	белая	$\sim 10^{-3}$ с	10-20
6	Салицилат натрия	$NaSiO_3$	40-340	желто-зеленая	$10_9 \dots 10_8$ с	1-40

Если сравнить эти параметры, то можно увидеть, что наибольшей световой суммой отличаются кристаллофосфоры, полученные при температуре кристаллизации порядка 1000° C , при этом размеры частиц остаются в пределах 5 мкм.

Промышленно изготовленные фосфоры обладают указанными параметрами. Именно такие мелкокристаллические частицы подходят для визуализации течений, так как очень легко увлекаются воздушными потоками.

Еще одним немаловажным свойством кристаллофосфоров является то, что их спектр излучения всегда расположен в более длинноволновой области, чем спектр поглощения.

Собственное поглощение [3] начинается обычно где-то в "близкой" и "далекой" ультрафиолетовой области и простирается дальше в коротковолновую часть спектра (рис.3).

Спектр поглощения зависит от состава основания. Так, в фосфоре (Zn, Cd) S (рис.4) по мере возрастания содержания Cd край фундаментального поглощения смещается из ультрафиолетовой области спектра в видимую. Следует отметить, что и спектры излучения фосфора (Zn, Cd) S ,

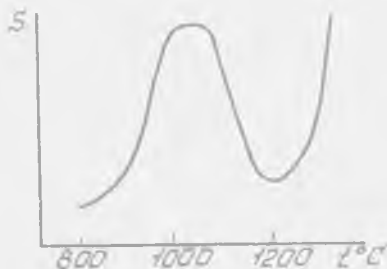


Рис.2. Зависимость S — световой суммы ZnS — фосфоров и температуры кристаллизации



Рис.3. Длинноволновый край фундаментального поглощения монокристалла чистого ZnS : k — показатель поглощения

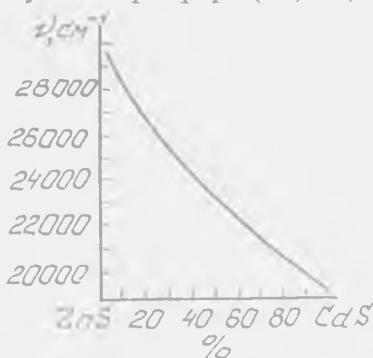


Рис.4. Длинноволновый край фундаментального поглощения чистого (Zn, Cu) S в зависимости от соотношения $Zn:Cu$

активированного Cu , также испытывают длинноволновое смещение с ростом содержания Cd . Спектры свечения смещаются из длинноволновой области в инфракрасную (рис.5).

Введение активатора приводит обычно к возникновению дополнительного поглощения двух видов. Один из них связан с тем, что новые образования могут непосредственно сами поглощать свет. Другой вид поглощения обусловлен тем, что чужеродные образования деформируют близрасположенную область решетки. Это приводит как бы к длинноволновому смещению края фундаментальной полосы (рис. 6). Большинство активаторов дает одну широкую полосу люминесценции (рис. 7).

Для практических целей изготавливают фосфоры, спектр свечения которых расположен в видимой области.

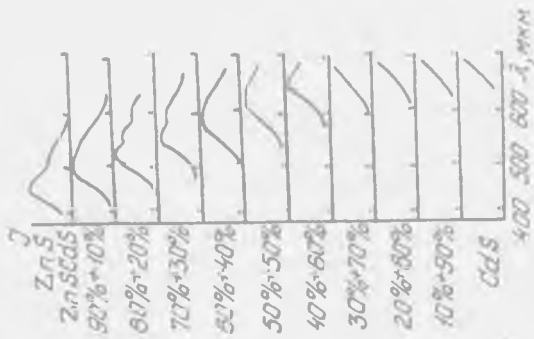


Рис. 5. Спектр свечения (Zn, Cd) S-Cu в зависимости от соотношения Zn: Cd: 1 — интенсивность свечения



Рис. 6. Спектр поглощения монокристалла ZnS при различных температурах максимум в области 370 мкм обусловлен, по-видимому, примесью Cu: k — показатель поглощения



Рис. 7. Спектр свечения фосфора ZnS-Cu при различных концентрациях Cu: 1 — интенсивность свечения; 1 — 7,29 · 10⁻³; 2 — 2,43 · 10⁻³; 3 — 2,2 · 10⁻⁴; 4 — 9 · 10⁻⁷; 5 — 2 · 10⁻³; 6 — < 10⁻⁷

2. СОСТАВ УСТАНОВКИ ПО ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ. ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВКИ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

2.1. СТРУКТУРА УСТАНОВКИ И ЕЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Экспериментальная установка для визуализации, наблюдения и регистрации течений с люминесцентными частицами состоит из азотного лазера, вихревой камеры и системы регистрации (рис. 8).

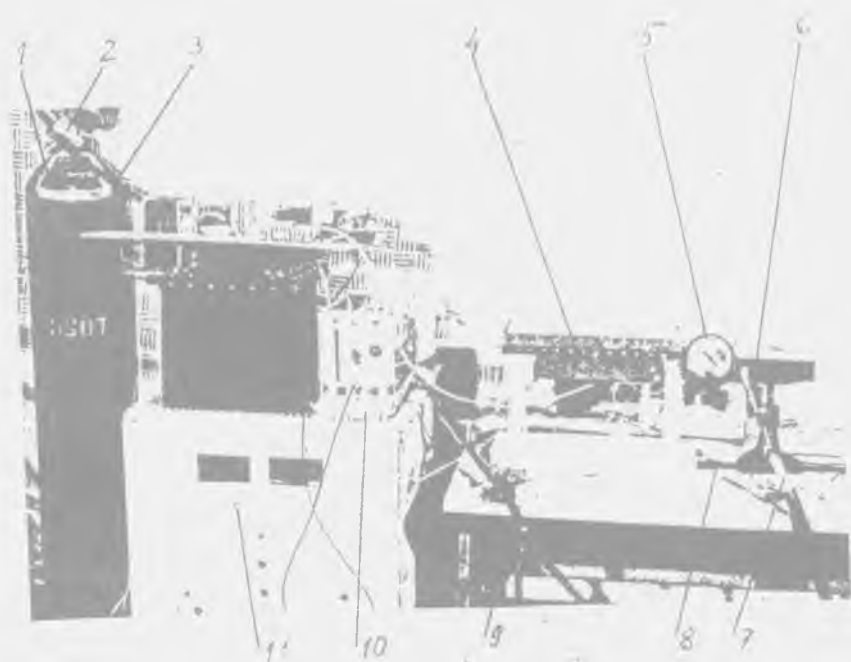


Рис. 8. Установка для исследования структур потоков с помощью люминесцентных сред: 1 — баллон с азотом $P = 150 \text{ кг/см}^2$; 2 — редуктор ДКП-65; 3 — линия подвода N_2 к лазеру; 4 — излучатель лазера азотного; 5 — манометр МО-4; 6 — испытательная камера; 7 — линия подвода сжатого воздуха от сети; 8 — оптическая скамья; 9 — линия откачки газа из излучателя; 10 — блок управления лазером; 11 — источник питания лазера

Азотный лазер, применяемый для исследований, работает на основе скользящего по поверхности диэлектрика разряда. Это позволяет получать геометрию лазерного "ножа" без использования оптических элементов. Лазерный «нож» имеет следующие параметры: толщина $h \sim 1$ мм, ширина $a \sim 20$ мм, угловая расходимость ~ 28 м/рад. Лазер генерирует излучение в ультрафиолетовой области спектра на $\lambda = 337,1$ нм в импульсном и импульсно-периодическом режимах.

Вихревая камера представляет собой устройство с кольцевым вихревым трактом. Она состоит из корпуса с входным окном для ввода лазерного луча, крышки с фильтром и отверстием со штуцером для подвода сжатого воздуха (рис. 9). Корпус выполнен

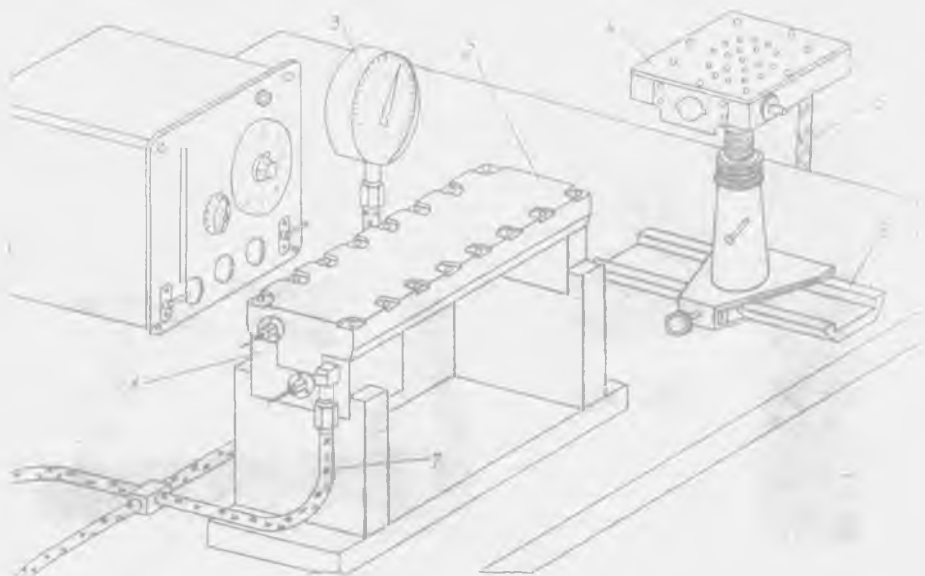


Рис. 9. Испытательная камера установки с излучателем: 1 — излучатель; 2 — выходное окно излучателя; 3 — манометр; 4 — испытательная камера; 5 — линия подачи сжатого воздуха; 6 — оптическая скамья; 7 — линия откачки газа из излучателя

из оргстекла, а его торцы окрашены черной краской для исключения внешней засветки. Окно для ввода излучения выполнено в виде

иллюминатора из кварцевого стекла для пропускания ультрафиолетового излучения во внутренний объем. Конструктивно допускается замена стекла или его чистка.

Сжатый воздух поступает в камеру через отверстие в корпусе по направлению кольцевого тракта с помощью штуцера. Воздух поступает в камеру под давлением $(1...3) \cdot 10^3$ Па и создает в камере вихревой поток со скоростью $\sim 1,0$ м/с. Для протока воздуха через камеру в центре крышки имеются отверстия $\varnothing 2$ мм.

Крышка изготовлена из оргстекла, что позволяет проводить фоторегистрацию без введения в конструкцию крышки дополнительных оптических элементов. Крышка герметично крепится к корпусу камеры винтами. Герметичность обеспечивается применением резиновых прокладок. Чтобы люминесцентные частицы не покидали внутреннего объема камеры, когда воздушный поток будет затягиваться в отверстия в крышке, на внутренней поверхности крышки установлена фильтрующая сетка, размеры ячеек которой не более 100 мкм, и слой ткани. Частицы могут притягиваться к сетке, поэтому время от времени необходимо периодически выключать подачу сжатого воздуха.

Модельная вихревая камера закрепляется на подвижной стойке микрометрическим винтом. Положение камеры может изменяться по высоте. Камера может также перемещаться по рельсу вдоль оптической оси. Перемещая камеру, можно изменять расстояние между окном излучателя и входным окном камеры, добиваясь тем самым оптимальной освещенности ее рабочей части внутреннего объема. Точность установки можно проконтролировать включением лазера.

Фоторегистратор устанавливается на штативе над крышкой камеры. Эксперимент заключается в следующем. Во внутренний объем вихревой камеры помещается люминофор. Камера герметично закрывается крышкой из оргстекла. Через штуцер в камеру подается сжатый воздух под давлением не более $(1...3) \cdot 10^3$ Па. В камере образуется вихревой поток воздуха, который вместе с люминофором движется по кольцевому тракту. Под действием ультрафиолетового излучения азотного лазера в потоке высвечи-

вакуются люминофорные частицы, визуализируя картину течения. Учитывая исключительно важную роль азотного лазера, нестандартность его конструкции, а также особенности эксплуатации при выполнении натурального эксперимента, рассмотрим подробнее эти вопросы.

2.2. АЗОТНЫЙ ЛАЗЕР. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.2.1. Лазер предназначен для использования в нормальных климатических условиях:

- при температуре воздуха от $+5$ до $+35^{\circ}\text{C}$,
- относительной влажности воздуха в диапазоне от 45 до 80%,
- атмосферном давлении от $8,4 \cdot 10^4$ до $10,7 \cdot 10^4$ Па.

2.2.2. Лазер допускает транспортировку и хранение при температуре от -10 до $+45^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности до 100%. В этом случае эксплуатация лазера допускается не ранее, чем через 24 часа с момента размещения его в помещении, удовлетворяющем п. 2.2.1.

2.2.3. Тип лазера — электроразрядный, частотно-импульсный, азотный.

2.2.4. Тип генерации — суперлюминесценция, оптический резонатор отсутствует.

2.2.5. Лазерное вещество — газообразный азот по ГОСТ 9293-74 или атмосферный воздух (в этом случае энергия излучения снижается в 2-3 раза).

2.2.6. Длина волны лазерного излучения (основной полосы) — $\lambda = 0,337$ мкм.

2.2.7. Рабочее давление лазерного вещества — 40 ± 5 Торр.

2.2.8. Частота следования импульсов лазерного излучения — до 20 Гц (кратковременно — до 100 Гц).

2.2.9. При генерации на азоте энергия излучения в импульсе составляет ~ 60 мкДж.

2.2.10. Длительность импульса лазерного излучения — 1,6 нс, по уровню 0,9 от полной энергии излучения в импульсе.

2.2.11. Вывод излучения — щелевой; ширина щели составляет 0,3 мм (при неточной выставке блока электродов накачки относительно зеркала лазера или при изгибе поверхности формирования разряда накачки возможно увеличение ширины щели); длина щели составляет ~20мм и определяется межэлектродным зазором (допускается уменьшение межэлектродного зазора, но не более чем на 25%).

2.2.12. Расходимость лазерного излучения по уровню 0,9 от полной энергии составляет:

- по ширине щели $\sim 10^{-3}$ рад;
- по длине щели (для разрядного промежутка ~20 мм) $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ рад;
- приведенная среднегеометрическая $\sim 6 \cdot 10^{-3}$ рад.

2.2.13. Накачка лазерного вещества осуществляется импульсным скользящим разрядом, формируемым в результате коммутации емкостного накопителя управляемым разрядником по схеме инвертируемого двухконтурного LC- генератора, представленной на рис. 10.

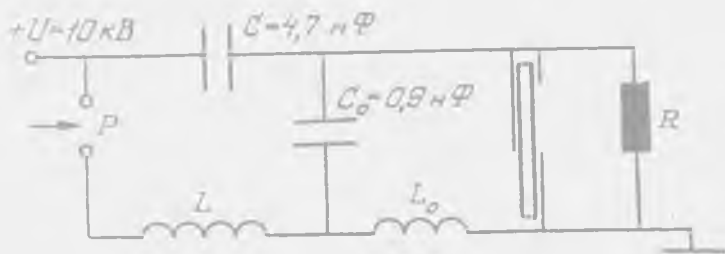


Рис. 10. Схема накачки азотного лазера

2.2.14. Распределение интенсивности лазерного излучения по углу в дальней зоне (более 1м от выходного окна) представлено на рис. 11.



Рис. 11. Распределение интенсивности излучения в пучке азотного лазера по углу в дальней зоне

2.2.15. Напряжение зарядки накопителя — $+10 \text{ кВ} \begin{pmatrix} +0 \\ -1 \end{pmatrix}$.

2.2.16. Параметры управляющего импульса для разрядника:

— амплитуда импульса — $-8 \dots -10 \text{ кВ}$;

— длительность импульса — $0,1 \dots 10 \text{ мкс}$;

— энергия в импульсе — не менее $0,03 \text{ Дж}$.

2.2.17. Ресурс работы излучателя от одной заправки азотом $\sim 10^5$ импульсов (снижение мощности излучения при меньшем числе импульсов обусловлено натеканием в разрядную камеру атмосферного воздуха ввиду нарушения герметичности).

2.2.18. Ресурс работы разрядника в данном излучателе составляет $\sim 2 \cdot 10^7$ имп.

2.2.19. Электрооптический КПД лазера $- 5 \cdot 10^{-2} \%$.

Данная лазерная установка относится к импульсным электро-разрядным лазерам низкого давления на сверхсвечении. Низкое время жизни верхнего лазерного уровня требует накачки лазерного вещества короткими (менее 20 нс) мощными импульсами. Коэффициент усиления лазера превышает 10^3 м^{-1} , что обеспечи-

вает быстрое насыщение усиления, а следовательно, препятствует формированию модового состава излучения и делает нецелесообразным использование оптического резонатора. Этому же препятствует малое время существования инверсии, соответствующее времени пролета фотоном расстояния $\sim 2-3$ м.

Нижний лазерный уровень имеет время жизни, значительно превышающее время жизни верхнего лазерного уровня, а поэтому данный лазерный переход является самоограниченным.

Малое время существования инверсии населенностей делает трудноосуществимой непосредственную коммутацию накопителя на разрядный промежуток, поскольку трудно обеспечить одновременно высокий энерговклад и малую его длительность. Это возможно при индуктивностях цепи энерговклада $\approx 10^{-9}$ Гн, что практически недостижимо при протекании разрядного тока цепи накачки через один коммутатор. Использование нескольких коммутаторов также невозможно без существенного усложнения конструкции излучателя и системы управления коммутаторами.

Использование двухконтурной разрядной цепи (см. рис. 11) решает эту проблему. В этом случае накачка осуществляется в два этапа. На первом — накопитель заряжает конденсаторы-обострители. Энерговклад в разрядный промежуток при этом отсутствует ввиду естественной задержки формирования разряда. Время этой задержки достаточно для перекачки большей части энергии, накопленной в накопителе, в обостритель. На втором этапе, после формирования разряда, осуществляется быстрый энерговклад из обострителя в плазму разряда по малоиндуктивной цепи контура разряда обострителя. При подобных способах накачки азотных лазеров достигается КПД $\sim 0,1\%$, что близко к теоретическому пределу.

Электродный узел представляет собой систему формирования скользящего разряда на основе фольгированного стеклотекстолита (возможно использование некоторых других материалов), расположенного в лазере. Подобная конструкция обеспечивает большой накачиваемый объем при низких уровнях напряжения на разрядном промежутке. Необходимая величина электрического поля при этом обеспечивается распределением его на границе раздела твердого и газообразного диэлектриков в данной электродной конструкции.

В процессе разряда инициирующий электрод имеет нулевую, а скользящий — отрицательную полярность. Это обеспечивает отталкивание электронов разряда от поверхности диэлектрика и увеличение накачиваемого объема. При данной полярности обеспечиваются наибольшие КПД лазера и ресурс системы формирования скользящего разряда.

Использование для накачки лазера схемы инвертирующего LC-генератора позволяет соединять один из электродов разрядника РУ-62 (катод) с заземленным корпусом излучателя, который при этом выполняет функции радиатора, что дает возможность повысить ресурс разрядника и, соответственно, лазера.

Оптическая система лазера включает в себя поворотное зеркало и выходное окно. Поворотное зеркало обеспечивает усиление излучения за два прохода активной среды, а выходное окно — вывод этого излучения из лазера. Для обеспечения двух проходов усиления необходима юстировка поворотного зеркала, для чего излучатель содержит юстировочный узел, в котором оправка зеркала крепится на сферическом шарнире, а подпружиненная система рычагов через вакуумные уплотнения посредством резьбовых штоков осуществляет необходимые повороты зеркала относительно центра шарнира.

Для периодического обновления лазерного вещества необходимо обеспечить предварительную откачку излучателя до давления не ниже 1 Торр, а затем произвести напуск азота (или воздуха) до необходимого давления. Это осуществляется через специальный штуцер откачки-напуска, расположенный на задней внешней стенке излучателя.

Для наблюдения за скользящим разрядом крышка излучателя выполнена прозрачной. Поскольку накачка лазерного вещества должна быть осуществлена за минимально возможное время, то индуктивность разрядной цепи также должна быть минимальной. С этой целью большинство конструктивных элементов внутри объема, охватываемого эпюрой токовых линий разряда, выполнено из немагнитных материалов (при частотах импульса энерговклада магнитными материалами, помимо неаустенитных сталей и им подобных традиционных материалов, являются также латуни и бронза). Кроме того, при подобных частотах уменьшается толщина токового слоя и, соответственно, возрастает сопротивление контурных элементов разрядной цепи. Для уменьшения потерь, обусловленных этой причиной, большинство токонесущих элементов выполнено из меди, обладающей, как известно, минимальным удельным сопротивлением из всех доступных материалов.

2.3. ОСНОВНЫЕ ПРИЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ. ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Юстировка поворотного зеркала лазера

Юстировка поворотного зеркала необходима после проведения работ с электродным узлом или поворотным зеркалом излучателя (замена, чистка и т. п.). Для юстировки необходимо заправить излучатель азотом до рабочего давления. Корпус излучателя и его юстировочные узлы должны быть **независимо заземлены**. Юстировка производится гаечным ключом 5,5 с изолированной державкой. Для изоляции целесообразно использовать фторопластовую трубку с толщиной стенки не менее 0,5 мм. Длина трубки и положение руки человека, производящего юстировку, должны быть такими, чтобы расстояние от металлических частей гаечного ключа до руки человека по поверхности фторопласта превышало 2,5 см. Юстировка производится на максимальной частоте следования импульсов, при которой сохраняется устойчивость скользящего разряда на протяжении не менее трех минут непрерывной работы.

Для юстировки необходимо:

1. Расположить излучатель таким образом, чтобы можно было наблюдать через крышку внутреннюю полость излучателя.

2. Поместить на расстоянии 10 см от выходного окна излучателя люминесцентный экран (можно — обычный лист бумаги в клетку).

3. Включить лазер и установить максимальную частоту следования импульсов энерговыклада, как это указано выше. При этом на экране должна появиться минимум одна светящаяся полоса. Если полосы две, то одна из них представляет собой непосредственное свержсвечение плазмы скользящего разряда, выходящее через окно вывода излучения, а другая — свержсвечение плазмы, отраженное от поворотного зеркала и вышедшее через окна вывода излучения. В этом случае необходимо поворотом юстировочных гаек обеспечить совпадение геометрических центров полос прямого и отраженного излучения между собой. При этом яркость свечения полученной полосы будет максимальна.

Если полоса одна, то отраженное излучение либо не попадает в выходное окно, тогда его можно заметить по люминесценции на передней внутренней стенке разрядной камеры через прозрачную крышку, либо и прямое и отраженное излучения лежат в плоскости формирования скользящего разряда. В обоих случаях необходимо

посредством юстировочных гаек получить на люминесцентном экране две полосы и повторить юстировку по схеме, описанной для двух полос.

Замена вышедших из строя элементов излучателя

При отсутствии нештатных ситуаций (механическое разрушение или электрический пробой элементов конструкции и разрядной цепи) возможны следующие неисправности, связанные с ресурсом элементов излучателя:

- 1) самопробой или невозможность управления разрядником;
- 2) локализация скользящего разряда;
- 3) снижение мощности излучения в случае, если ни один из двух предыдущих факторов не имеет места.

В первом случае наиболее вероятной причиной неисправности является выработка разрядником своего ресурса. Для замены разрядника необходимо снять крышку разрядника, отвернуть его и установить новый, не забыв при этом о зарядном кабеле и кабеле поджига. Во втором случае наиболее вероятной причиной неисправности является эрозия поверхности формирования скользящего разряда или рабочих кромок электродов. Для замены электродного узла необходимо снять крышку излучателя и прижимную планку, осуществляющую контакт токов ввода с иницирующим электродом, и извлечь электродный узел. После этого необходимо установить новый электродный узел и повторить все другие описанные операции в обратном порядке.

В третьем случае возможна одна из четырех неисправностей:

- металлизация поверхности зеркала;
- металлизация окна вывода излучения;
- "отравление" лазерного вещества;
- нарушение герметичности разрядной камеры.

Для проверки герметичности необходимо откачать разрядную камеру до минимального давления, пережать струбциной шланги системы «откачки-напуска» и выдержать не менее 6 часов. После этого необходимо откачать шланги системы откачки-напуска, отключив насос и сняв струбцину. Давление в разрядной камере должно соответствовать среднему натеканию, не превышающему ~ 5 Торр/час. В противном случае следует найти и устранить течь. Для проверки возможности «отравления» среды заменить баллон с азотом и произвести перезарядку лазерного вещества. Если средняя энергия излучения за импульс возрастает, необходимо:

1) произвести чистку внутренней поверхности разрядной камеры и электродного узла ватным тампоном, смоченным ацетоном, а затем — еще одним, смоченным этиловым спиртом;

2) продуть азотом (или воздухом) под давлением шланги откачки-напуска;

3) производить непрерывную откачку разрядной камеры в течение трех часов.

В дальнейшем производить заправку лазера азотом из нового баллона (некоторое время после чистки энергия излучения будет несколько меньше ожидаемой, постепенно возрастая). Для проверки металлизации выводного окна и поворотного зеркала необходимо произвести осмотр и, если визуально наблюдается помутнение оптики, изготовить новую. Все операции, связанные с металлизацией, кроме осмотра оптики, должны производиться специалистами.

Указания по мерам безопасности

В данном лазере имеют место следующие факторы опасности: высокое напряжение;

вакуум;

высокое давление;

интенсивное лазерное излучение;

СВЧ и ВЧ-излучение.

В связи с этим необходимо соблюдать следующие меры безопасности:

1. Запрещается производить какие-либо ремонтные работы на подключенной к сети установке.

2. При проведении ремонтных работ на установке необходимо наличие как минимум двух человек, из которых работы производит только один из них, а остальные осуществляют наблюдение.

3. Перед проведением ремонтных работ заземлить кабель зарядки накопителя.

4. При проведении работ с лазером и его системой откачки-напуска необходимо соблюдать меры безопасности, предусмотренные ГОСТ 1.92091-81 «Сосуды, работающие под давлением. Установка и эксплуатация в производственных помещениях. Требования безопасности».

5. Не допускается попадание прямого и отраженного лазерного излучения в глаза. Запрещается расположение на трассе луча отражающих предметов.

6. Запрещается прикасаться к заземленному корпусу излучателя и к кабелю заземления на расстоянии менее двух метров от его подсоединения к излучателю.

7. Запрещается находиться длительное время в непосредственной близости (до 15 см) от излучателя при средней мощности вклада, превышающей 20 Вт.

3. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЙ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕД

Для натурального эксперимента люминисцентные частицы подбираются по принципу их возбуждения УФ-излучением. Частицы должны иметь длинную или короткую люминесценцию в зависимости от решаемой задачи. В табл. 1 приведены характеристики люминофоров, используемых в экспериментах по визуализации течений. Так, например, для визуализации полной картины течения, картины обтекания тел в вихревой камере применяются люминофоры с долгой люминесценцией $ZnS-Cu$ и $ZnS-CdS$. Для получения треков частиц следует использовать силицилат натрия ($NaSiO_3$) с длительностью свечения $\tau \sim 10^{-8} \dots 10^{-9}$ с и ФД-630 ($CaS, SrS-Cu$) с $\tau \sim 10^{-3}$ с, так как в условиях эксперимента для получения треков частиц необходимо, чтобы «частица» мгновенно погасала после ее возбуждения.

Регистрация картины течений с люминесцентными частицами производится в видимом диапазоне в темноте, фотоаппарат должен работать в ждущем режиме при открытой диафрагме или с выдержкой 1/30 с. После прохождения светового импульса лазера происходит засветка пленки от люминесцирующих частиц, и затвор закрывается. В экспериментах используется высокочувствительная фотопленка Т22 чувствительностью 1400 Ед. ГОСТ.

В качестве фотоаппарата применяется фотоаппарат «Зенит ТТЛ» с объективом «Гелиос 44». Могут быть использованы другие фотоаппараты соответствующего класса. Для получения увеличенного изображения структур течений в камере объектив устанавливается на удлинительные кольца.

Методика визуального исследования структур течений с использованием люминесцентных частиц

Для исследования структур течений в модельной вихревой камере с использованием для визуализации люминесцентных частиц разработана методика, включающая в себя разделы, связанные с подготовительными работами и собственно исследованиями.

Подготовительные работы включают в себя:

1. Подготовку к работе вакуумного насоса, при необходимости заправку его маслом.
2. Подготовку к работе лазера, проверку заземления и его общий осмотр.
3. Подведение к вихревой камере сжатого воздуха.
4. Подготовку регистрирующей аппаратуры, закрепление ее на штативе над камерой, настройку на регистрируемую область потока газа или жидкости.

Проведение эксперимента

Для визуализации и регистрации общей картины течений в камере, а также картины обтекания тел, помещенных в вихревую камеру, необходимо выполнить следующее:

1. Включить лазер согласно инструкции по его эксплуатации, которая приведена ниже.
2. Направить лазерный «нож» на входное окно экспериментальной камеры.
3. Передвижением камеры вдоль оптической скамьи найти положение, при котором обеспечивается максимальная освещенность камеры.
4. Выставить необходимую высоту, при которой лазерный «нож» пройдет через центр кварцевого окна камеры.
5. Закрепить камеру в указанном положении.
6. Настроить фотоаппарат на регистрируемое сечение.
7. Определить масштабный коэффициент изображения. Для этого зарегистрировать изображение линейки, помещенной в плоскость лазерного «ножа».
8. Налить в камеру воды до уровня, когда плоскость лазерного «ножа» будет касаться поверхности воды.
9. Подать в камеру сжатый воздух под давлением $\sim (1..3) \cdot 10^{-3}$ Па.

10. Выключить свет в помещении.
11. Подать в камеру люминесцентные частицы (ZnS).
12. Осуществить визуальное наблюдение течений через видоскопатель при полностью открытой диафрагме.
13. Зарегистрировать картину течений.
14. Отключить все системы.
15. Обработать фотопленку и изготовить фотоотпечатки (см., например, рис. 12).



Рис. 12. Визуализация потока, обтекающего цилиндрическое тело в кольцевом канале с помощью люминофора $ZnS-Cu$: 1 — цилиндр \varnothing 8 мм; 2 — кольцевой канал

Для получения треков в эксперименте используется люминесцентный порошок ФД-630 с длительностью свечения 10^{-3} с. В отличие от ZnS , который добавляется в воду, салицилат натрия растворяется в воде, поэтому эксперименты проводятся с сухим воздухом.

Проведя, как в первом случае, все подготовительные операции, насыпаем порошок люминофора в камеру; закрываем камеру крышкой с фильтром; подаем воздух ($p = 1...3 \cdot 10^{-3}$ Па; выключаем свет; производим регистрацию треков частиц в ждущем режиме работы фотоаппарата.

По окончании эксперимента выключаем лазер и все системы; обрабатываем пленку; анализируем изображения.

Подготовка и включение элементов экспериментальной установки

Н а с о с

В работе используется насос вакуумный с электроприводом НВЭ. Прежде чем приступить к работе с насосом, необходимо:

1. Произвести внешний осмотр.
2. Проверить наличие заземления.
3. Проверить наличие масла в насосе и при необходимости дополнить его до необходимого уровня — до метки в смотровом окне (в насосе использовать только масло марки ВМ-4).
4. Соединить резиновые шланги насоса (ниппель «РАЗР») с откачиваемой камерой.
5. Произвести откачку газов из рабочей камеры лазера.
6. Отключить насос.

А з о т н ы й л а з е р

Прежде чем начать работу с лазером, осуществить его внешний осмотр и наличие заземления. Затем наполнить его камеру азотом и осуществить его включение:

1. Включить сетевую вилку (№1) в сеть $\sim 220\text{В}$.
2. Прогреть рабочую камеру в течение 3-5 минут.
3. Включить вилку разрядника (вилку №2 в колодку №2).
4. Включить генератор импульсов в сеть $\sim 220\text{В}$.
5. Поставить тумблер в положение «ВКЛ».
6. Выставить на высоковольтном источнике питания требуемое напряжение $V \leq 10 \text{ кВ}$.
7. Произвести запуск генератора импульсов:
разовый: тумблер в положение «РУЧН»и кнопка «ВКЛ»;
частотный: тумблер в положение «АВТ».
8. Для работы лазера в частотном режиме необходимо грубой регулировкой по диапазонам и плавной внутри каждого диапазона выставить необходимую частоту.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хиллерс, Бутен Н., Хасса Р., Хенсон Л. Визуализация поля скоростей в потоке газа при помощи возбуждаемой лазером фосфоресценции диацетила // Приборы для научных исследований. 1984. №12. С. 71-72.
2. Крылова Е. С. // ЖТФ. 1950. №20. С. 905-908.
3. Антонов-Романовский В. В. Кинетика фотолюминесценции кристаллофоров. М.: Наука, 1966. 323 с.
4. Труды ФИАН. 1959. №11. С. 125.
5. Прикладная электролюминесценция / Под ред. М. В. Фока М.: Сов. радио, 1974. 412 с.
6. Левшин В. Л. Фотолюминесценция жидких и твердых веществ. М.: Наука, 1951. 322 с.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГАЗОВЫХ И ЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СРЕД И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Составители: *Николай Дмитриевич Быстров,
Олег Анатольевич Левченко,
Любовь Николаевна Мединская,
Геннадий Юрьевич Быков*

Редактор Г. А. Усачева
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Т. И. Щелокова

Подписано в печать 15.06.96. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ.л. 1,6.
Усл. кр.-отт. 1,7. Уч.-изд.л. 1,7. Тираж 150 экз.
Заказ 69. Арт. С-35/96.

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С. П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского государственного аэрокосмического
университета. 443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.