ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

В.Н. ГРИШАНОВ, Е.А. ИЗЖЕУРОВ, Д.А. УГЛАНОВ

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

УДК 621.37/.39 : 536.24
ББК 32.86-5
Г 859

Инновационная образовательная программа "Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий"

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. И. С. Загузов
канд. техн. наук, доц. В. С. Егорычев

Гришанов В. Н.

Г 859 **Системы охлаждения мощных лазеров**: учеб. пособие / *В. Н. Гришанов, Е. А. Изжеуров, Д. А. Угланов.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 140 с. : ил.

ISBN 5-7883-0450-4

В учебном пособии представлена информация по системам охлаждения мощных лазеров с источниками электропитания, основам их конструирования и эксплуатации, затронуты вопросы согласования систем охлаждения лазерных излучателей и источников питания. в пособии также приведены теплофизические свойства хладагентов, перспективных для использования в системах охлаждения лазеров, и затронуты материаловедческие аспекты, позволяющие осуществлять выбор материалов, не коррозирующих при длительном контакте с хладагентами, описаны датчики температур, методика их градуировки и особенности применения в системах охлаждения лазеров.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 200202 – «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике» по дисциплинам «Измерение параметров и эксплуатация лазерных установок», «Источники и приемники излучения», «Теория и проектирование проточных газовых лазеров», «Источники питания лазеров».

УДК 621.37/.39 : 536.24
ББК 32.86-5

ISBN 5-7883-0450-4

© Гришанов В. Н., Изжеуров Е. А.,
Угланов Д. А., 2006
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ..... 5
1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МОЩНЫХ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРАХ..... 7
2. СПОСОБЫ ОТВОДА ТЕПЛА В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРОВ..... 16
2.1. Способы охлаждения лазерных установок.....17
2.2. Жидкостные системы охлаждения.....20
2.3. Газовые системы охлаждения.....35
2.4. Контактное охлаждение.....41
2.5. Гетерофазное охлаждение.....45
2.6. Гибридные системы охлаждения.....47
3. ОХЛАЖДАЮЩИЕ СРЕДЫ.....52
4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНЫХ БЛОКОВ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ.....60
4.1. Энергетический баланс технологического комплекса CO_2-лазер - холодильная машина.....60
4.2. Выбор мощности системы охлаждения на основе модулей Пельтье.....62
4.3. Выбор нагнетательного элемента.....65
4.4. Алгоритм расчета системы охлаждения лазера.....74

4.5. Пример расчета системы охлаждения лазера ЛГН-703……75
4.6. Элементы систем охлаждения……79
4.6.1. Насосы без встроенного привода……87
4.6.2. Насосы с встроенным приводом……88
4.6.3. Трубопроводная арматура……91
5. ТЕПЛООТВОД В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЛАЗЕРОВ. СОГЛАСОВАНИЕ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ И ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ……93
5.1. Методика выбора способа охлаждения источника питания……97
5.2. Выбор оптимального способа охлаждения источника питания на ранних стадиях его проектирования……99
5.3. Обеспечение теплового режима мощных полупроводниковых приборов лазера……101
5.4. Вентиляторы для принудительного конвекционного теплоотвода мощных полупроводниковых приборов лазера……105
6. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРОВ……112
6.1. Термопреобразователи сопротивления……113
6.2. Термоэлектрические преобразователи……116
6.3. Диоды и транзисторы в качестве датчиков температуры……125
6.4. Особенности измерения температуры в жидкостях и газах……127
6.5. Градуировка датчиков температуры……131
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ……133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ……136
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ……138

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение лазерной техники и технологии в производство требует повышения эксплуатационных свойств лазеров, что невозможно без системного подхода к их проектированию. Системный подход к проектированию лазеров, использование оптимальных технических решений, качественных материалов и передовых технологий сборки, монтажа и настройки лазерных установок, учет эргономических факторов способствуют преодолению временного разрыва между потенциалом когерентного излучения мощных лазеров, заложенным фундаментальными исследованиями, и его реализацией в серийных устройствах.

Одной из наиболее важных практических задач современной квантовой электроники является создание лазерных установок с высокими удельными характеристиками. Серьезным недостатком существующих лазеров является низкая эффективность преобразования электрической энергии в энергию когерентного излучения. Для повышения эффективности необходим правильный подбор и оптимизация всех систем и устройств, входящие в состав лазера, в частности, системы охлаждения.

Система охлаждения мощного лазера, наряду с излучателем и источником электропитания является одной из подсистем лазерной установки. Разработка высококачественной системы охлаждения требует учета ряда технических аспектов, таких, как тип лазера, его назначение и условия его эксплуатации. За последние несколько десятилетий было поставлено большое количество экспериментов по совершенствованию схем охлаждения лазеров. Однако этот материал разбросан по многочисленным журнальным публикациям и техническим описаниям лазерных установок, что затрудняет его использование в

учебном процессе. Поэтому систематизация и анализ этих данных, сведение их в одно учебное пособие упрощает ознакомление с существующими техническими решениями систем охлаждения мощных лазеров, методиками оценки параметров как систем охлаждения в целом, так и отдельных их компонент.

Содержание и построение учебного пособия определяется необходимостью дать стройное представление о способах охлаждения, которые получили распространение в лазерных установках, согласовании систем отвода тепла от лазерного излучателя и его источника электропитания. Поскольку контроль и стабилизация температурного режима лазера невозможны без датчиков температуры, то им также посвящена часть разделов пособия.

Методики оценки параметров систем охлаждения и их элементов доведены до числовых оценок и проиллюстрированы многочисленными примерами. Справочный материал, приведенный в таблицах и на графиках, позволяет выполнять инженерные расчеты по системам охлаждения лазеров и электронных блоков.

Форма учебного пособия, включающая в себя список контрольных вопросов, позволяет осуществлять проверку усвоения почерпнутых сведений. Изложение материала предполагает знание молекулярной физики и физики электромагнитных явлений, основ термодинамики и теплопередачи, электротехники и электроники.

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МОЩНЫХ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРАХ

Обычно лазер определяют как генератор электромагнитного излучения оптического диапазона, основанный на использовании вынужденного излучения.

С другой стороны, лазер может рассматриваться как техническое устройство для преобразования энергии в одном из ее видов в электромагнитную энергию высокой частоты (как правило, видимого или инфракрасного диапазона спектра). Принцип действия лазеров, и в частности газовых лазеров с электрической накачкой (электроразрядных), достаточно широко известен.

При описании работы лазеров используются различные физические модели и технические схемы, с помощью которых проводится анализ изменений потенциальной квантовой энергии излучающих сред, атомов или молекул в присутствии сильного электромагнитного поля с частотой, соответствующей переходу между двумя состояниями. Экспериментальный и теоретический анализ таких моделей позволяет определить технические параметры лазеров и сформулировать требования к оптимальным физическим условиям, а также практической схеме реализации лазерного устройства.

В газовых (и особенно инфракрасных молекулярных) лазерах достаточно большая длительность жизни возбужденных состояний и физические свойства газов позволяют использовать разнообразные средства накачки активных сред. При организации активных сред в форме газовых потоков оказывается возможным разделение отдельных стадий лазерного цикла во времени и пространстве. Специализация узлов лазерного устройства в таких технических схемах способствует оптимизации отдельной стадии лазерного цикла и повышает его эффективность.

На рис. 1.1а показана функциональная схема электроразрядного лазерного излучателя с активной средой, создаваемой в газовом потоке. В приведенной функциональной схеме, используемой для реализации мощных CO-,CO_2-лазеров, практически каждой наиболее важной стадии лазерного цикла соответствует отдельный конструктивно оформленный функциональный узел [1]. На рис. 1.1б, в, г показаны изменения основных характеристик газообразной лазерной среды, движущейся через основные конструктивные узлы. Как видно из рис. 1.1в, активное вещество формируется в области адиабатического расширения газа. Эта область существенна для CO- и CO_2-лазеров, поскольку уменьшение температуры рабочей смеси за счет адиабатического расширения газа увеличивает эффективность лазерной генерации.

Температура газа (рис. 1.1в) вначале увеличивается в течение времени пролета газа через резонатор, а затем уменьшается в теплообменнике до значений температуры охлаждающего агента. В компрессоре температура газа вновь возрастает. Характерно, что потери энергии сжатого газа (энтальпии) происходят только в теплообменнике (рис. 1.1г).

Подобные схемы помогают наглядно представить работу лазерного устройства в целом и оценить изменение различных физических характеристик, как лазерной среды, так и рабочего тела (газа). Например, для лазерной среды можно представить динамику изменения плотности частиц на уровнях лазерного цикла, разность этих плотностей, усиление и др. Для рабочей газовой смеси могут быть существенны температура, давление, энтальпия и т. д.

В конкретных конструкциях лазерных излучателей некоторые рабочие области и узлы могут частично интегрироваться или отсутствовать. В отпаянном CO- и CO_2-лазерах с диффузионным теплообменом отсутствует область ускорения или сжатия газа, а области теплопередачи, накачки (энерговклада), формирования активной среды и лазерной генерации совмещены. Изменения энергии молекул газа в этом случае удобно (а для импульсных режимов необходимо) рассматривать в зависимости от временной координаты. Для стационарного режима генерации CO-, CO_2-лазера временное изменение энергии справедливо для одиночной молекулы излучающего газа.

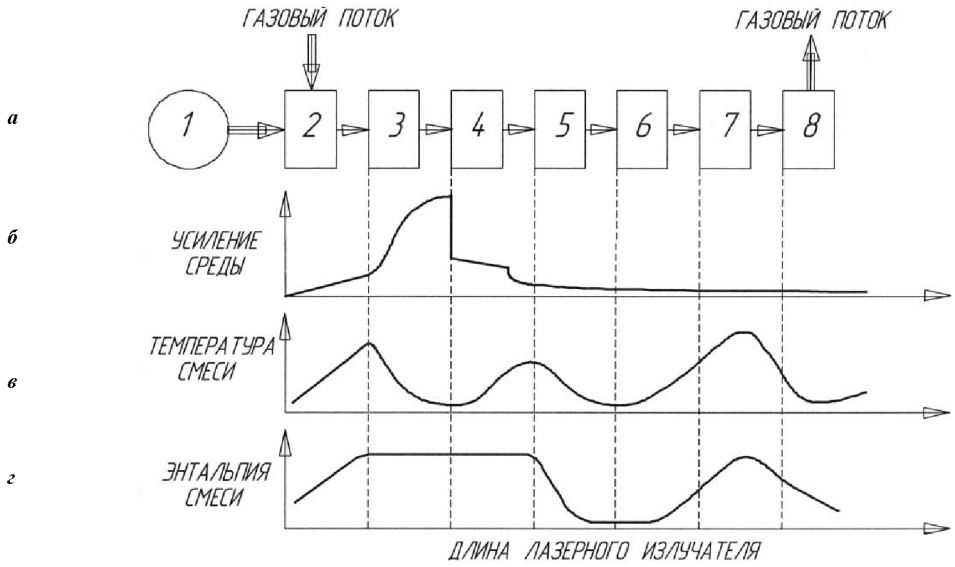


Рис. 1.1. Распределения усиления (б), температуры (в) и энтальпии (г) активной среды по функциональным областям (а) лазерного излучателя с потоком газовой смеси:
1 - источник электропитания; 2 - область энерговклада; 3 - область адиабатического охлаждения газа; 4 - область отбора оптической мощности; 5 - теплообменник; 6 - гетерогенный восстановитель химического состава смеси; 7 - компрессор; 8 - теплообменник

Основным объектом охлаждения твердотельного лазера является лампа накачки (электроды лампы и ее внутренняя поверхность), которая возбуждает его активную среду. Превышение значения температуры выше допустимого уровня может привести к испарению материалов с поверхности электродов и внутренней поверхности лампы, нарушению ее формы и даже разрушению.

Таким образом, в зависимости от типа лазера, его назначения, условий его эксплуатации и других аспектов существуют особенности отличающие системы охлаждения твердотельных и газовых лазеров.

Известно, что далеко не вся энергия накачки активной среды лазера преобразуется в излучение, львиная доля энергии почти сразу переходит в теплоту. На рис. 1.2 представлено распределение энергетических потоков от розетки до выходного излучения. Здесь видно, что очень много энергии рассеивается на балластных резисторах, стабилизирующих разряд постоянного тока в быстропрокачном лазере на CO_2, много энергии переходит в тепло в процессе генерации излучения за счёт самого физического принципа генерации излучения в четырёхуровневой квантовой системе. Видно также, что свою не-

малую лепту вносят механические устройства — вентилятор, потери напора в теплообменнике и т.д.

В соответствии с этой схемой полный КПД лазера можно представить в виде:

$$\eta = \frac{P_Л}{W_\Sigma} = \frac{W_Н}{W_\Sigma}\frac{W_{ЭЛ}}{W_Н}\frac{W_0}{W_{ЭЛ}}\frac{W_К}{W_0}\frac{W_Р}{W_К}\frac{W_П}{W_Р}\frac{P_Л}{W_П} = \eta_В\eta_Н\eta_{ЭЛ}\eta_К\eta_{КВ}\eta_Р\eta_{ОБ} = \eta_В\eta_Н\eta_{ЭЛ}\eta_{ЭО}, \quad (1.1)$$

где W_Σ - полная электрическая мощность, подведенная к лазеру; $W_Н$ - мощность, расходуемая на питание системы накачки; $W_{ЭЛ}$ - мощность, подведенная к электродам ГРК; W_0 - мощность, вкладываемая в рабочую смесь; $W_К$ - мощность, запасенная в нижних колебательных степенях свободы молекул N_2 и уровня $001CO_2$; $W_Р$ - мощность, которая может быть получена в виде излучения при 100%-ной эффективности резонатора, полностью охватывающего весь объем ГРК; $W_П$ — мощность излучения реального резонатора при полном заполнении излучением объема ГРК; $\eta_В = W_Н / W_\Sigma = 1 - P_В / W_\Sigma$ КПД, учитывающий потери мощности во вспомогательных системах лазера ($P_В$); $\eta_Н = W_{ЭЛ} / W_Н = 1 - (P_{ИП} + P_Б) / W_\Sigma$ — КПД, учитывающий потери мощности в источнике питания ($P_{ИП}$) и балластной нагрузке ($P_Б$); $\eta_{ЭЛ} = W_0 / W_{ЭЛ} = 1 - P_{ЭЛ} / W_{ЭЛ}$ - КПД, учитывающий потери мощности в приэлектродных слоях разряда ($P_{ЭЛ}$); $\eta_К = W_К / W_0 = 1 - P_{ПН} / W_0$ — колебательный КПД, учитывающий потери мощности, вложенной в рабочую смесь, на прямой нагрев, химические преобразования и т. д. ($P_{ПН}$); $\eta_{КВ} = W_Р / W_К = 1 - P_{РЕЛ} / W_К$ - квантовый КПД, который учитывает релаксационные потери ($P_{РЕЛ}$); $\eta_Р = W_П / W_Р = 1 - P_Р / W_Р$ - КПД резонатора ($W_Р$ - потери мощности в резонаторе); $\eta_{ОБ} = P_Л / W_П = 1 - P_{ОБ} / W_П$ — объемный КПД ($P_{ОБ}$ — потери мощности

вследствие неполного заполнения излучением объем ГРК);

$\eta_{ЭО} = \eta_К \eta_{КВ} \eta_Р \eta_{ОБ} = {}^{P_Л}\!/_{W_0}$ — электрооптический КПД.

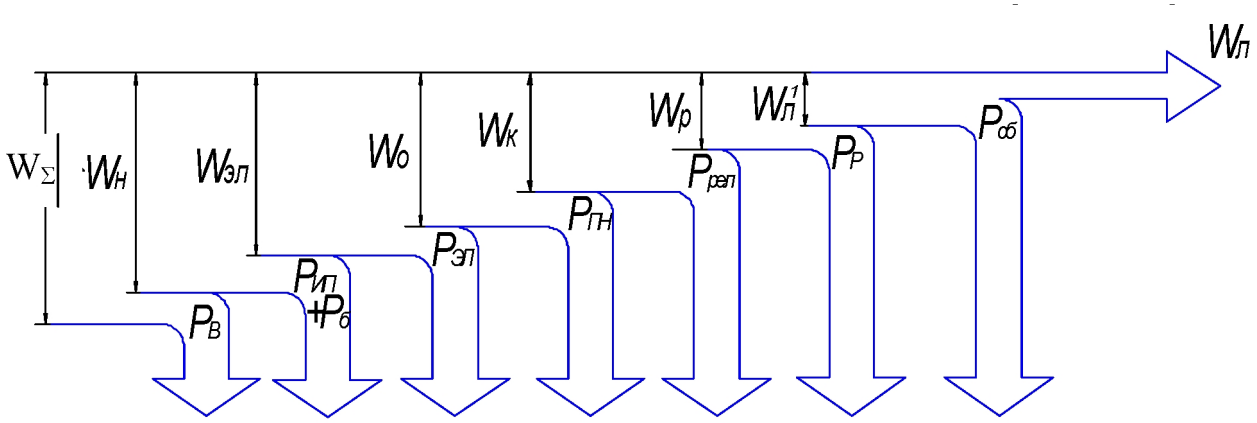


Рис. 1.2. Схема основных каналов потери энергии БПЛ

Всю эту избыточную тепловую энергию необходимо отводить из лазерной среды, в противном случае наблюдается сначала срыв генерации излучения, а потом накачивающий разряда переходит из тлеющего в дуговой. Поэтому мощные лазеры включают в себя систему охлаждения, что подтверждается приведенными ниже примерами.

Рассмотрим баланс энергии лазера ТЛ-5. Подводимая полная мощность W=140 кВт. Потери во вспомогательных системах (в электроприводе и подшипниках компрессоров, а также в элементах системы управления) $P_В$ = 7 кВт. Потери за счет френелевского отражения на гранях выходного окна (монокристалл КС1) $P_{вых}$= 0,5 кВт. Мощность, поглощенная в зеркалах резонатора, $P_{ЗЕР}$= 1,2 кВт. Мощность $P_К$= 28,6 кВт, обусловленная нагревом газа в компрессоре, должна сниматься в «холодном» теплообменнике, а $P_{РЕЛ}$ + $P_Р$= 52 кВт - в «горячем». Схема системы охлаждения должна быть построена так, чтобы при минимальном расходе воды был обеспечен требуемый температурный режим всех элементов лазера.

Система охлаждения лазера ТЛ-5, показанная на рис. 1.3, построена на основе открытого контура. В соответствии с уровнем снимаемой тепловой мощности охлаждаемые элементы лазера разбиты на три группы, подключенные па-

раллельно, а именно: а) резонатор 5 и компрессор 10 ($P_а = P_{ЗЕР} + P_{ВЫХ} + P_{ВЫХ} = 1,2 + 7 + 0,5 = 8,7$ кВт); б) балластная нагрузка б и газоразрядная камера 9 ($P_Б = 25,1 + 14,8 = 39,9$ кВт); в) холодный и горячий теплообменники 7, 8 ($P_в \sim P_П + P_{РЕЛ} + P_р = 28,6 + 52 = 80,6$ кВт). Для распределения расхода воды по параллельным ветвям в соответствии со снимаемой мощностью установлены регулируемые дроссели 4 и реле протока 3.

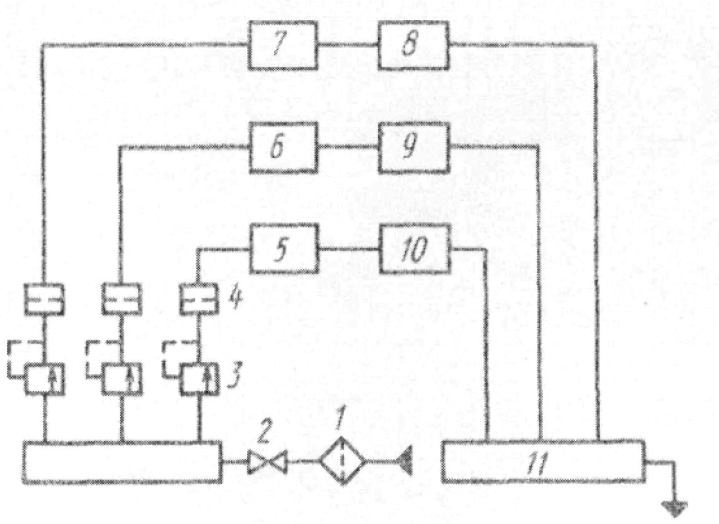


Рис.1.3. Схема системы охлаждения лазера ТЛ-5:
1 - фильтр; 2 - вентиль; 3 - реле протока; 4 - регулируемые дроссели; 5 - резонатор; 6 - балластная нагрузка; 7 - «холодный» теплообменник; 8 - «горячий» теплообменник; 9 - ГРК; 10- компрессор; 11 - сливной коллектор

При охлаждении балластной нагрузки и катодов ГРК может возникнуть высоковольтный потенциал на охлаждающей воде. Поэтому подводящий и отводящий трубопроводы выполнены из диэлектрических шлангов, уложенных в заземленные металлорукава.

На рис. 1.4. представлена диаграмма энергетического баланса БПЛ ТЛ-5.

Схема системы охлаждения лазера мод. SP820 фирмы «Спектра Физикс» приведена на рис. 1.5. В схеме используется охлаждение электродов ГРК, находящихся под высоким потенциалом, водой, циркулирующей во внутреннем замкнутом контуре. Контур состоит из резервуара 12 с дистиллированной водой и насоса 13. Для сохранения в течение длительной работы низкого электрического сопротивления воды в контуре установлен деионизатор 11. Тепло-

та, снимаемая с электродов, в теплообменнике 10 переходит к воде, текущей в открытом контуре.

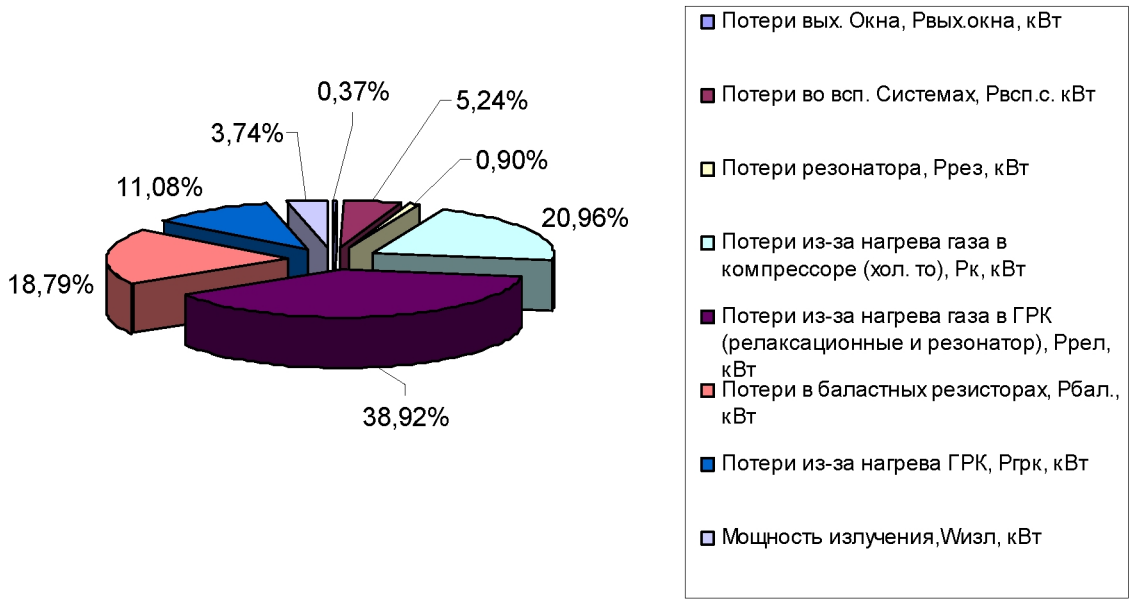


Рис. 1.4. Диаграмма энергетического баланса БПЛ ТЛ-5

При обычной схеме охлаждения рабочей смеси ее температура на входе в зону возбуждения определяется входной температурой теплоносителя. Как уже упоминалось выше, обычно теплоносителем служит вода, температура которой может существенно меняться в зависимости от условий эксплуатации лазера (местных климатических условий, времени года и т. д.) от +10 до +30 °С. Колебания температуры смеси при отсутствии соответствующей системы стабилизации приводят к колебаниям мощности излучения лазера. Для стабилизации температуры смеси нередко используют низкотемпературную систему стабилизации температуры теплоносителя. При этом также удается снизить температуру рабочей смеси на входе в зону возбуждения. Так, например, в лазере RS1000 (ФРГ) фреоновый холодильник обеспечивает температуру воды 10...15 °С с точностью поддержания заданной температуры ±0,5°. Экспериментально было получено повышение эффективности импульсного CO_2-лазера в 1,5...2 раза при снижении температуры рабочей смеси с 300 до 200 К [2].

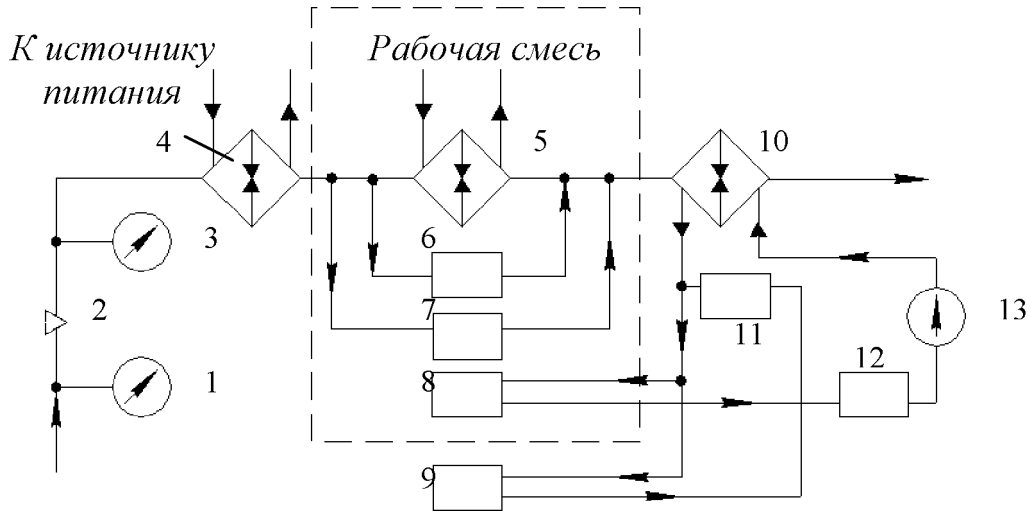


Рис. 1.5. Схема охлаждения лазера SP820:
1 - датчик температуры; 2 - редуктор; 5 - датчик давления; 4 - теплообменник воздух-вода; 5 - теплообменник основной; 6 - охлаждаемые элементы резонатора; 7 - вентилятор; 8 - катод ГРК; 9 - аноды ГРК; 10 - теплообменник вода-вода; 11 - деионизатор; 12 - резервуар; 13 - насос

На рис. 1.6 представлен многоканальный CO_2-лазер «Иглан-3», который состоит из четырех основных систем: I — газовая система; II — лазерная головка; III — система охлаждения; IV — система электропитания и стабилизации разряда. Система охлаждения собрана по двухконтурной схеме. Внутренний контур с трансформаторным маслом состоит из маслонасосов 15, теплообменников 14 и охлаждает лазерную головку и блок балластных резисторов 16. Масло охлаждается водой 19, подключаемой от внешней сети. Трансформаторное масло имеет более высокое и стабильное во времени значение пробивной напряженности электрического поля по сравнению с дистиллированной водой, что позволяет минимизировать размеры блоков балластных резисторов и использовать для монтажа электротехнические материалы, высокие эксплуатационные свойства которых эксперимен тально подтверждены многолетней работой на трансформаторных подстанциях. Подобное техническое решение, состоящее в охлаждении высоковольтных блоков трансформаторным маслом, получило распространение в системах охлаждения мощных лазеров.

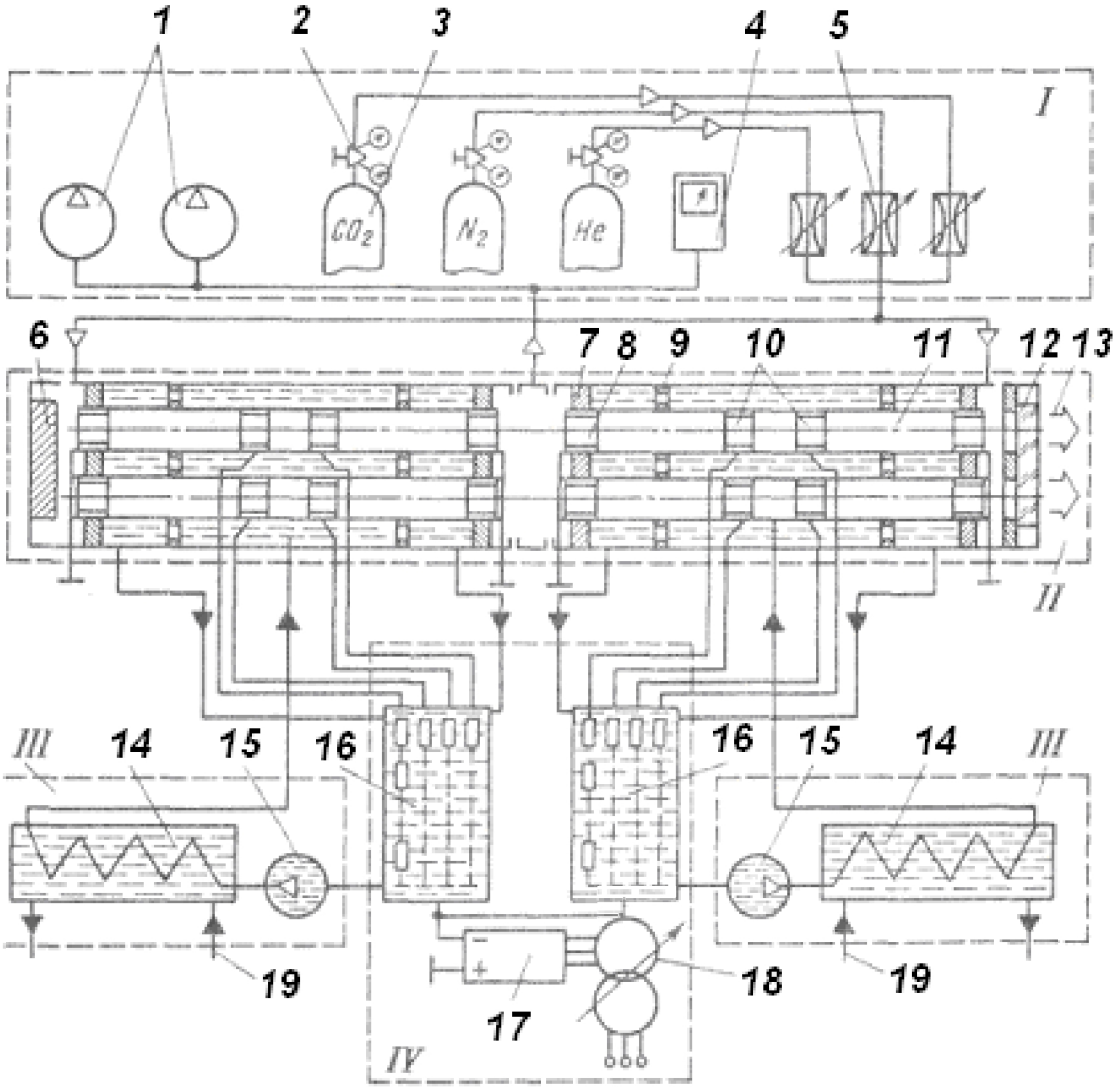


Рис. 1.6. Схема лазера «ИГЛАН-3»:

1 - вакуумный насос; 2 - редуктор; 3 - баллон с рабочим газом; 4 - вакуумметр ВДГ-1; 5 - натекатель; 6 - глухое зеркало; 7 - сепаратор-уплотнитель; 8 - анод; 9 - сепаратор; 10 - катод; 11 - разрядная трубка; 12 - выходное зеркало; 13 - лазерные пучки; 14 - теплообменник; 15 - маслонасос; 16 - бак с балластными резисторами; 17 - выпрямитель; 18 - регулируемый высоковольтный трансформатор; 19 - охлаждающая вода

2. СПОСОБЫ ОТВОДА ТЕПЛА В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

Серьезным недостатком многих существующих лазеров является низкая эффективность преобразования электрической энергии в энергию когерентного излучения. Для повышения эффективности необходимо охлаждение. Создание высокоэффективной системы охлаждения требует учета ряда аспектов, таких как тип лазера и его назначение. Поэтому существуют особенности отличающие системы охлаждения твердотельных и газовых лазеров.

Основным объектом охлаждения твердотельного лазера является лампа накачки (электроды лампы и ее внутренняя поверхность), которая возбуждает его активную среду. Превышение значения температуры выше допустимого уровня может привести к испарению материалов с поверхности электродов и внутренней поверхности лампы, нарушению ее формы и даже разрушению. Наиболее распространенным и эффективным охладителем ламп накачки твердотельного лазера является очищенная деионизированная вода, так как она не оставляет осадка на внешней поверхности лампы, что вызовет ухудшение ее выходных характеристик. Такая вода может использоваться для охлаждения электрических соединений, чтобы предотвратить короткое замыкание и окисления контактов в результате электролиза. Все элементы охлаждающей системы должны быть выполнены из пластика, нержавеющей стали или других материалов, совместимых с деионизированной водой.

Активная среда газовых лазеров обычно возбуждается электроразрядом, и для охлаждения рабочей смеси используются теплообменники газ-жидкость. Если это лазер с прокачкой рабочей смеси, то теплообменник размещается в его газовом тракте, а если это диффузионный лазер, то в нем ох-

лаждение происходит в специально организованной рубашке охлаждения. Выбор материала, из которого изготовляется теплообменник, будет зависеть от вида газовой смеси и задач теплообмена. Снижение температуры газовой смеси необходимо в большинстве случаев для увеличения эффективности генерации и для предотвращения ее деградации.

2.1. Способы охлаждения лазерных установок

В лазерах, как газовых, так и твердотельных теплоотвод может происходить за счет: а) **жидкостного охлаждения**; б) **газового охлаждения**; в) **контактного охлаждения**; г) **гетерофазного охлаждения (на фазовых переходах)**.

Выбор способа теплоотвода проводится, исходя из особенностей функционирования и свойств охлаждаемого лазера, по требуемой эффективности теплоотвода [3]. Кроме того, при назначении способа охлаждения учитывают также условия, в которых эксплуатируется весь прибор. Основными параметрами, определяющими выбор способа охлаждения, являются: а) **коэффициент теплоотдачи - *α***, б) **необходимая температура активной среды**.

Требуемая величина коэффициента теплообмена находится по результатам расчета теплового режима рассматриваемого лазерного излучателя. Методы оценки реализуемой величины коэффициента α изложены ниже. Опыт конструирования показывает, что при применении воздушного способа охлаждения удается получить коэффициент теплоотдачи до 120 - 150 $Вт/м^2 \cdot К$. Внедрение устройств, реализующих вихревой эффект, позволяет увеличить значения коэффициента теплоотдачи до 300 - 500 $Вт/м^2 \cdot К$. При жидкостном способе теплоотдачи указанное значение коэффициентов теплоотдачи реализуется уже в условиях естественной конвекции. Обычно при жидкостном способе охлаждения значения α лежат в пределах 2000 - 7000 $Вт/м^2 \cdot К$, однако в мощных системах, обеспечивающих большие напоры и расходы, значения α достигают 10000 $Вт/м^2 \cdot К$ и выше. Гетерофазное (испарительное) охлаждение позволяет получить больший эффект охлаждения, но за счет теплоты фазового перехода.

Изложенные соображения говорят в пользу выбора жидкости в качестве среды для интенсивного охлаждения. Однако применение жидкостного способа теплоотвода усложняет конструкцию и эксплуатацию всего лазера. Поэтому применять его следует только там, где оно обеспечивает получение высоких эксплуатационных характеристик.

Для охлаждения активных элементов и ламп накачки, входящих в состав твердотельного лазера, применяют три первых способа теплоотвода. Однако, при этом теплопередача должна осуществляться без заметного снижения эффективности радиационного обмена при накачке. Это обстоятельство, в свою очередь, определяет ряд специфических требований к охлаждающим средам, а при контактном теплоотводе - выбору конструкции теплопроводов.

Активная среда газовых лазеров обычно возбуждается электроразрядным способом и для ее охлаждения используется теплообменник газ-жидкость. Теплообменник размещается в газовом тракте, если это лазер с прокачкой рабочей смеси, или так чтобы активная среда охлаждалась оребренной поверхностью теплообменника. Выбор материала, из которого изготавливается теплообменник, будет зависеть от вида газовой смеси и задач теплообмена. Снижение температуры газовой смеси необходимо в большинстве случаев для увеличения эффективности генерации и для уменьшения деградации ее характеристик.

Оптические элементы с рабочими поверхностями (грани полного внутреннего отражения и электрооптические отражатели, отражающие и преломляющие грани оптических элементов отражателей) допускают, как правило, только воздушное охлаждение.

Очень часто системы охлаждения лазера значительно увеличивают вес и габариты всего устройства, что может ограничить область его применения. Это привело к созданию малогабаритных систем охлаждения, способных обеспечить нормальное функционирование приборов, рассчитанных на большие энергии излучения и большую частоту повторения импульсов в широком интервале изменения температуры. Специфические условия работы отдельных лазеров (например, в последнее время используемые в шоу-бизнесе ла-

зерные системы выполняются только с воздушными системами охлаждения, от жидкостных систем охлаждения начинают отказываться) оказывают существенное влияние на выбор способа теплоотвода и элементов системы охлаждения. Именно этим можно объяснить то разнообразие систем, с которыми можно столкнуться при знакомстве с приборами, выпускаемыми промышленностью.

В пределах каждого типа системы охлаждения могут быть: а) **автономными**, б) **неавтономными**. Неавтономные системы охлаждения требуют наличия внешних жидкостных или газовых магистралей, автономные при необходимости могут работать и в полевых условиях.

В любой из указанных систем охлаждения, кроме контактных, в зависимости от требуемых технических характеристик или конструктивных особенностей создаваемых приборов по-разному решается вопрос о распределении потоков хладагента в головке лазера. Например, активное тело и лампы накачки (твердотельный лазер) или газоразрядная трубка с рабочей смесью (газовый лазер) и охлаждающий тракт могут находиться в прозрачных трубках, а хладагент — последовательно или параллельно протекает в зазорах между ними, либо в камере реализуется поперечное обтекание ее элементов, либо в приборах, рассчитанных на работу с большой скважностью импульсов, находит применение конструктивно более простой вариант: хладоагент обтекает одновременно все элементы камеры (в твердотельном лазере импульсного лазерного дальномера ДАК-2М-1 [4]).

В системах с замкнутым контуром количество хладагента неизменно. Как правило, это жидкостные системы. Системы с разомкнутым контуром требуют постоянного либо периодического поступления новых порций хладагента. К одноконтурным разомкнутым системам относятся, например, воздушные системы охлаждения без воздухоохладителя, питающиеся от магистрали. Повышенные требования к чистоте хладагента, охлаждающего камеру лазера, и необходимость в регулировании температурного режима оптических элементов привели к созданию многоконтурных систем, включающих в себя, кроме замкнутого контура хладагента, контуры, обеспечивающие сброс тепла. На-

пример, дистиллированная вода в замкнутом контуре проходит через камеру лазера и теплообменное устройство, построенное на базе полупроводниковой термобатареи, горячие спаи которой охлаждаются водой из магистрали.

Наряду с проблемами вывода тепла из резонатора лазера возникает задача обеспечения заданной температуры хладагента, т. е. построение системы сброса тепла и термостабилизации хладагента. В зависимости от того, как решается указанная задача, системы охлаждения подразделяются по виду теплообменного устройства. Газоохладители в газовых системах в настоящее время действуют на базе фреоновых холодильных агрегатов и специально разработанных вихревых трубок. В жидкостных системах охлаждения жидкость в замкнутом контуре охлаждается либо проточной водой (теплообменное устройство типа «вода—вода» в лазерных технологических установках ряда «Квант»), либо воздухом (теплообменное устройство «вода—воздух» в лазерных технологических комплексах «Бистар» [5]). Кроме указанных типов теплообменных устройств, сброс тепла может осуществляться с помощью полупроводниковых термоэлектрических батарей или холодильных агрегатов.

2.2. Жидкостные системы охлаждения

Из многих систем жидкостного охлаждения лазеров наибольшее распространение в технологических лазерах получили одноконтурные и двухконтурные системы в автономном и неавтономном исполнении.

Система охлаждения проточной водой. Эта наиболее простая жидкостная система охлаждения относится к неавтономным разомкнутым одноконтурным системам и может быть применена там, где имеется вода соответствующего качества и необходимого напора. Такая система используется в таких лазерах, как ЛГН-703, ИЛГН-706 и др.

Одна из схем охлаждения камеры лазера приведена на рис. 2.1. Вода из магистрали через входной штуцер поступает в камеру, омывает активный элемент и лампу накачки и затем через выходной штуцер сливается в канализацию. Термометр и расходомер контролируют соответственно температуру и расход воды в системе. Гидрореле электрически связано с системой блокиров-

ки и сигнализации; оно контролирует давление в тракте охлаждения и предупреждает возможность аварии в случае прекращения подачи воды.

При необходимости охлаждать несколько камер лазеров (лазер с усилителем, линейки лазеров) в зависимости от мощности тепловыделений ветви охлаждения камер включаются либо последовательно, либо параллельно. В случае параллельного монтажа в целях равномерного распределения потоков воды ветви оформляют конструктивно так, чтобы их гидродинамическое сопротивление было бы одинаковым. Если это обеспечить нельзя, то на входе и выходе охлаждаемой системы устанавливают водораспределители.

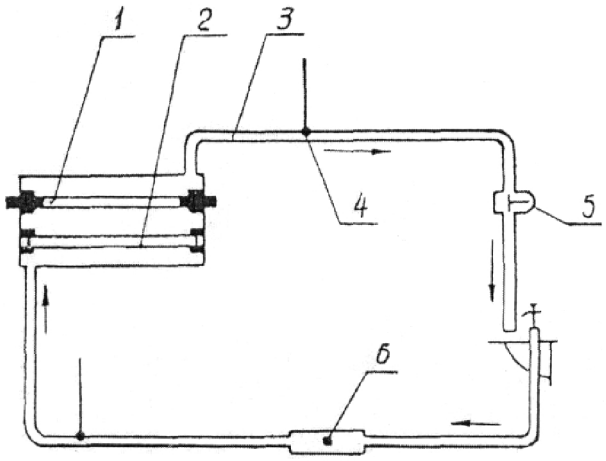


Рис. 2.1. Система охлаждения проточной водой: 1 - лампа накачки; 2 - активное тело; 3 - шланги; 4 - термометр; 5 - гидрореле; 6 - расходомер

Простота обслуживания и минимальное дополнительное оборудование являются преимуществами, присущими системам охлаждения проточной водой; они обеспечили таким системам широкое распространение, особенно в лабораторных и исследовательских установках и макетах. Однако при охлаждении проточной водой на трубках и стенках тракта охлаждения может образовываться осадок, кроме того, возможно засорение каналов инородными телами. Вследствие загрязнения элементов осветительной системы снижаются ее эффективность и освещенность активного стержня, что приводит к падению уровня выходной энергии излучения. Кроме того, возможности использования магистрали ограничены давлением в магистрали, не превышающим

2—2,5 *атм* и относительно небольшими расходами воды. К тому же следует отметить, что в городах, где, в основном, применяются лазеры, качество воды, оцениваемое по количеству опасных для систем охлаждения включений - ржавчина из магистральных труб, соли жёсткости, механическая примеси, совершенно не удовлетворяет требованиям систем охлаждения. Следствием применения такой воды бывает заращение просвета штуцеров систем охлаждения, перегрев и, даже, выход из строя излучателей. Отмеченные недостатки устраняются в системах охлаждения с замкнутыми контурами.

Замкнутые одноконтурные системы. Замкнутые одноконтурные жидкостные системы применяются в приборах, функционирующих небольшие промежутки времени с большими паузами. Сброс тепла, аккумулированного охлаждающей жидкостью, осуществляется естественным рассеиванием. В состав контура таких систем входят подводящие шланги, бак с охлаждающей жидкостью и нагнетательный элемент, осуществляющий принудительное движение жидкости в контуре. Как правило, циркуляция жидкости осуществляется с помощью насосов. Однако возможны и другие решения. На рис. 2.2 изображена схема одноконтурной замкнутой системы твердотельного лазера, в которой движение охлаждающей жидкости осуществляется путем искусственного повышения давления в баке с этой жидкостью. Такая система используется в таких лазерах, как ГОР-300, АРНИ-206.

До включения прибора охлаждающая жидкость находится в герметическом баке 11. В процессе работы лазера в бак 11 через регулятор давления подается сжатый газ либо из баллона (автономный вариант), либо из магистрали. Вследствие повышения давления в баке жидкость по шлангам поступает в камеру лазера, где последовательно омывает активное тело и лампы накачки, помещенные в трубки, а затем сливается в бак *6*. Давление в баке регистрируется манометром, избыточное давление ограничивается стравливающим клапаном. Контроль за уровнем жидкости в баке, за ее температурой и расходом ведется по уровнемеру, термометру и расходомеру. При израсходовании жидкости в баке 11 рукояткой изменяется положение крана, в результате чего сжатый газ поступает в бак 6. Схема построена так, что при этом направление

движения жидкости в камере лазера не меняется. Достоинством такой системы охлаждения является способность осуществлять циркуляцию агрессивных фильтрующих жидкостей под большим давлением.

Для лазеров, работающих продолжительное время, а также при необходимости термостатировать охлаждающую жидкость в системы охлаждения включают дополнительные контуры подвода и сброса тепла.

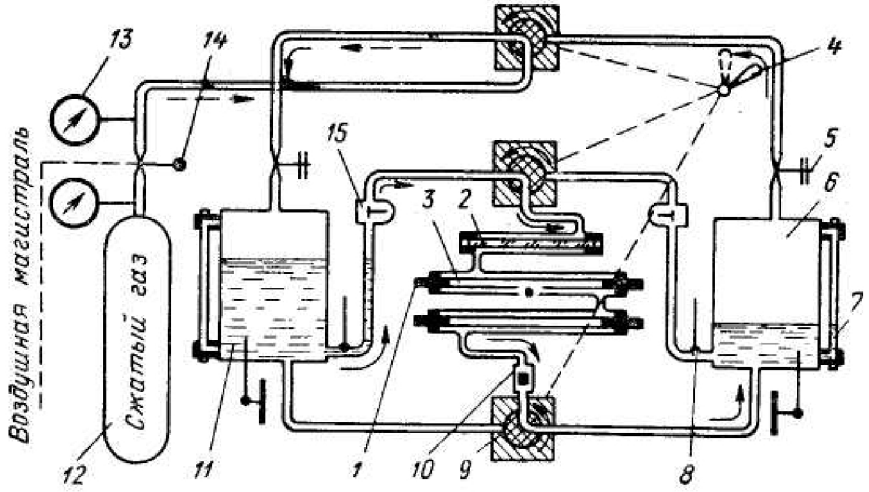


Рис. 2.2. Замкнутая одноконтурная жидкостная система охлаждения:
1 - лампа накачки; 2 - активное тело; 3 - трубка; 4 - рукоятка; 5 - клапан; 6 - бак; 7 - указатель уровня; 8 - термометр; 9 - кран; 10 - расходомер; 11 - бак; 12 - баллон; 13 - манометр; 14 - регулятор давления; 15 - гидрореле

Двухконтурные системы. На рис. 2.3 приведена наиболее распространенная двухконтурная неавтономная система охлаждения с теплообменным устройством типа «вода—вода» с термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру. Насос подает жидкость внутреннего замкнутого контура из бака по шлангам к камере прибора, где она проходит последовательно по каналам вдоль лампы накачки и вдоль активного элемента. Пройдя камеру, жидкость попадает в противоточный теплообменник, где охлаждается и затем сливается в бак. Внешний контур системы — разомкнутый. Вода из магистрали поступает в теплообменник, снимает выделяющееся при работе лазера тепло, а затем направляется в слив.

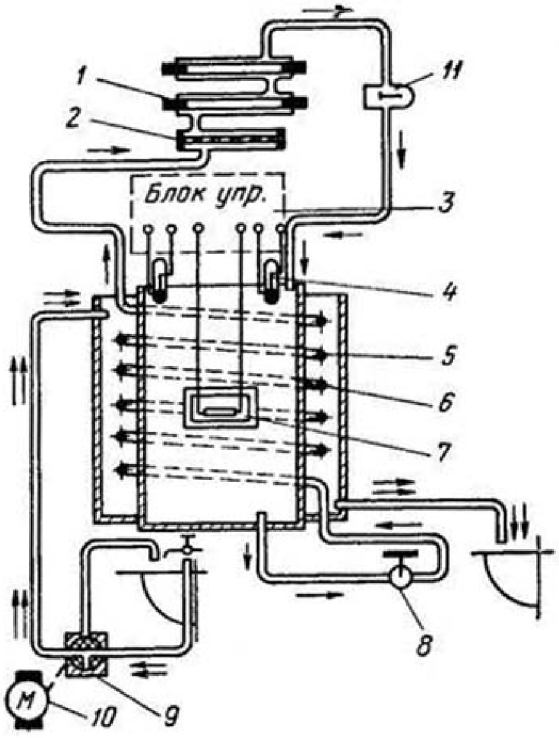


Рис. 2.3. Двухконтурная жидкостная система охлаждения:
1 - лампа накачки; 2 - активное тело; 3 - блок управления; 4 - термоконтактор; 5 - теплообменник; 6 - бак; 7 - нагреватель;8 - насос; 9 - кран; 10 - двигатель; 11 - гидрореле

разомкнутый контур сброса тепла;

замкнутый контур охлаждения элементов лазера.

Система термостабилизации обеспечивает поддержание температуры жидкости в замкнутом контуре в заданных пределах. Система термостабилизации в рассматриваемой схеме состоит из двух термоконтакторов, нагревателя и двигателя, регулирующего по сигналу от блока управления кран подачи магистральной воды в теплообменник.

В приборе ГОР-300Б такая система охлаждения выполнена в виде отдельного блока, устанавливаемого в шкафу управления и питания всего прибора. Конструкция показана на рис. 2.4. Корпус блока выполнен из нержавеющей стали, и состоит из двух коаксиально расположенных цилиндрических баков: внутреннего и наружного. Внутренний бак емкостью 7 л. служит для хранения дистиллированной воды. На крышке и его днище с соответст-

вующими прокладками установлены термоконтакторы и нагреватель. Между внутренним и наружным баками уложен змеевик из нержавеющей стали. По змеевику протекает вода замкнутого контура. Снаружи змеевик охлаждается водопроводной водой, протекающей сверху вниз по винтообразному сепаратору между баками. Перекрывающий кран и управляющий им электродвигатель связаны между собой системой рычагов и расположены под днищем баков. Там же установлен насос.

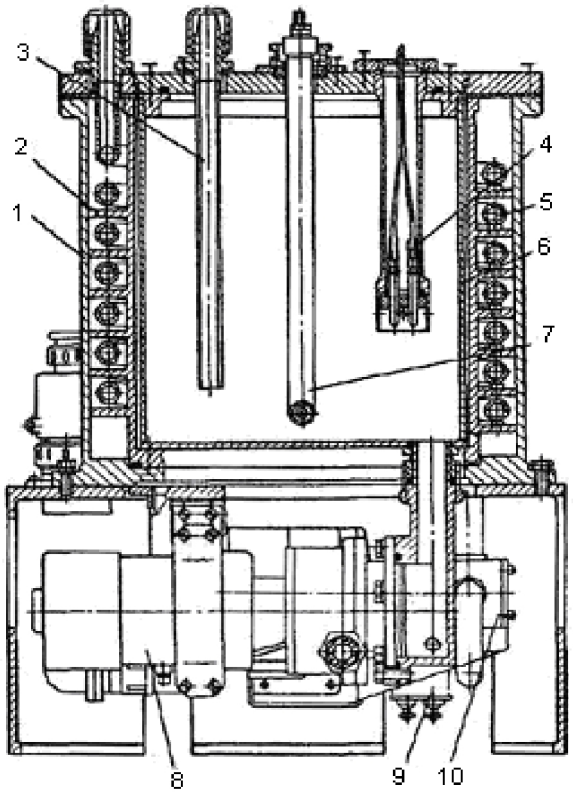


Рис. 2.4. Блок охлаждения прибора охлаждения ГОР-300Б:
1 - бак наружный; 2 - сепаратор; 3 - заливная трубка; 4 - термоконтакторы; 5 - змеевик; 6 - бак внутренний; 7 - нагреватель; 8 - насос; 9 - электродвигатель; 10 - кран

Компоновка системы охлаждения в виде самостоятельного блока соответствует функционально-модульному принципу конструирования и строения сложных технических систем, состоящих из разнородных по назначению и принципам функционирования модулей. Монтаж системы состоит в поключении электропитания и электроблокировок по воде, а также шлангов внутреннего и внешнего контуров охлаждения. Габариты конструкции впи-

сываются в прямоугольный параллелипипед размерами 300х400х700 мм, большую часть которого занимает бак с дистиллированной водой.

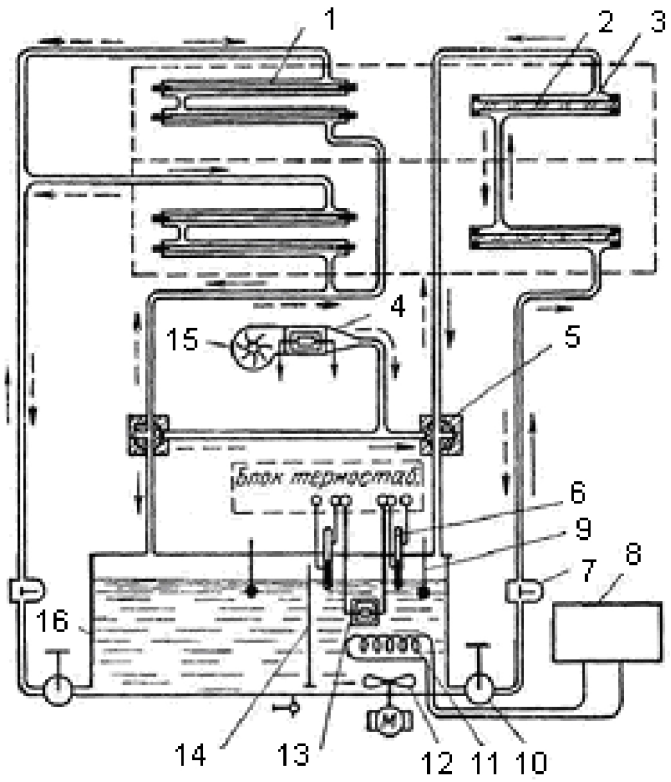


Рис. 2.5. Многоконтурная жидкостная система охлаждения:
1 - лампы накачки; 2 - активное тело; 3 - трубка; 4 - нагреватель; 5 - кран; 6 - термоконтакторы; 7 - гидрореле; 8 - холодильный агрегат; 9 - термометр; 10 - насос; 11 - испаритель; 12 - мешалка; 13 - нагреватель; 14 - перегородка; 15 - вентилятор; 16 - бак

На рис. 2.5 приведена схема автономной системы охлаждения с двумя раздельными замкнутыми контурами охлаждения осветителя и ламп накачки и активных элементов с системой термостабилизации и системой осушки. Система термостабилизации, контроля и сигнализации представлена теми же элементами, что и система охлаждения прибора ГОР-300Б (см. рис. 2.3). Сброс тепла осуществляется с помощью холодильного фреонового агрегата 8, испарители 11 которого помещены в баки с охлаждающей жидкостью. Применение холодильного агрегата позволяет использовать лазер для работы на открытых площадках. Данная схема допускает эксплуатацию прибора в зимнее время на дистиллированной воде. Это достигается благодаря применению системы осушки.

Осушитель состоит из вентилятора 15 и нагревательного элемента 4. Нагнетаемый вентилятором воздух проходит через нагревательный элемент и через два трехходовых вентиля 5 попадает в оба контура охлаждения. Далее поток воздуха проходит через рубашки активных тел и ламп накачки 1, попадает в бак 16 и через сливной кран вместе с остатками воды выходит из системы. Температура воздуха на входе в контуры охлаждения на 50—60 град выше температуры наружного воздуха, и удаление воды из контуров происходит либо при увлечении потоком, либо испарением вследствие низкой относительной влажности воздуха. Система осушки включается при сливе жидкости и перед началом работы прибора до заливки дистиллированной воды для прогрева трактов системы охлаждения. Её включение сопровождается поворотом вентилей 5 и тем самым открывается доступ воздуха из осушителя в камеры лазера.

Распределение потоков жидкости в камере. Существенное влияние на температурный режим активного тела твердотельного лазера или газоразрядной трубки газового лазера оказывает распределение потоков жидкости при их обтекании. Рациональная конструкция активного тела и соответствующее распределение обтекающих его потоков позволяют повысить эффективность теплоотвода и уменьшить перепады температур в образце. Для цилиндрических тел наряду с продольным используется поперечное обтекание его боковой поверхности. На рис. 2.6 схематично показаны некоторые варианты охлаждения активного тела твердотельного лазера.

Экспериментальное сравнение эффективности указанных вариантов показало, что применение поперечного обтекания обеспечивает лучшие выходные характеристики лазера по сравнению с продольным при одной и той же температуре хладагента и одинаковой холодопроизводительности системы сброса тепла. Наибольший эффект, как и следовало ожидать, достигается в конструкции активного тела на рис. 2.6 в). В рубиновом стержне диаметром 10 мм, длиной 420 мм, при ширине щелей 1 мм, на частоте посылки импульсов 10 Гц и средней мощности накачки 5 кВт был получен к. п. д. в 1,8 раза больший, чем при использовании того же кристалла при распределении пото-

ков по схеме на рис. 2.6 б). С другой стороны схема распределения потоков на рис. 2.6 б) наиболее приемлема для газовых лазеров.

С точки зрения повышения эффективности теплообмена, необходимо развивать площадь поверхности контакта активного элемента с хладагентом. Поэтому существует тенденция перехода к таким геометрическим формам твердотельных активных элементов с развитой внешней поверхностью, как прямоугольные пластины и диски.

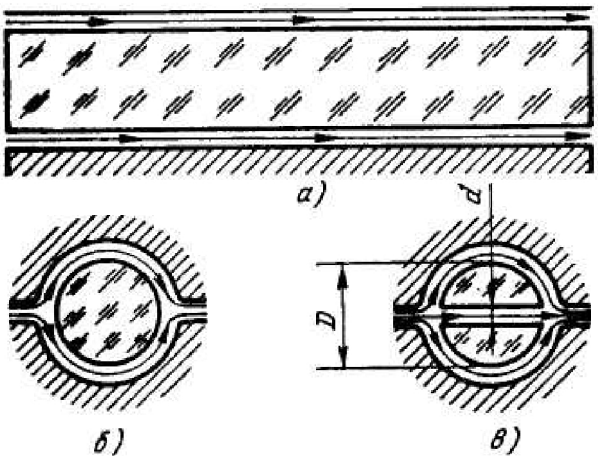


Рис. 2.6. Распределение потоков жидкости при обтекании активного тела:
а - продольное обтекание; *б* - поперечное обтекание; *в* - поперечное обтекание (разрезной вариант)

Особенности конструирования и эксплуатации жидкостных систем охлаждения связаны с заполнением системы охлаждения, включением нагнетательного элемента, явлением кавитации и герметичностью трактов.

Заполнение системы охлаждения. При включении нагнетательного элемента жидкость, вытесняя из тракта воздух, по шлангам и каналам заполняет камеру лазера. Подъем уровня жидкости в камере и вытеснение воздуха происходит до тех пор, пока жидкость не закроет отверстие выходного штуцера. Объем канала, расположенный выше выходного отверстия, может не заполниться. Как правило, в подобном объеме образуется один или несколько крупных устойчивых пузырей. Пузыри такой природы легко устраняются при просмотре входных и выходных узлов камеры лазера. Внутренние полости

переходников и каналов охлаждения газоразрядных трубок, активного тела, ламп накачки и других элементов следует выполнять таким образом, чтобы происходило полное заполнение камеры. Для этого необходимо расположить выходной штуцер в наивысшей точке каналов охлаждения. С точки зрения заполнения камеры лазера входной штуцер можно расположить в любом месте, но для обеспечения полного слива жидкости целесообразнее поместить штуцер в нижней точке заполняемого объема. На рис. 2.7 показана конструкция переходника, с помощью которого крепится и герметизируется активное тело, а также подается жидкость в канал охлаждения. При его применении отсутствуют застойные зоны и места возможного образования и скопления воздушных пузырей на входе в канал охлаждения.

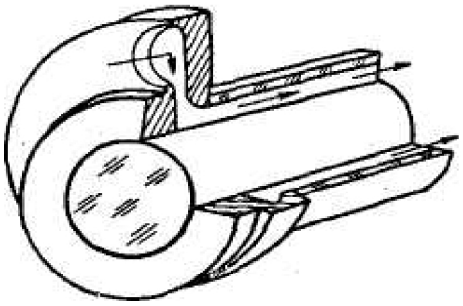


Рис. 2.7. Конструкция переходника.

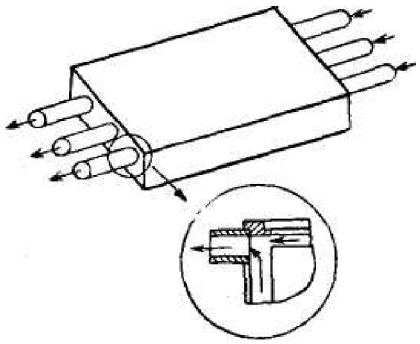


Рис. 2.8. Расположение штуцеров в камере с плоским активным элементом.

Количество входных и выходных штуцеров зависит от форм и размеров активных тел. В приборах с цилиндрическими активными телами можно ограничиться одним входным и одним выходным штуцером. Если же активное тело имеет форму параллелепипеда, то ограничиться двумя штуцерами невозможно из-за образования воздушных пузырей в углах плоского канала охлаждения. В этом случае количество штуцеров определится шириной сечения входа в камеру лазера (При необходимости ввести в конструкцию несколько штуцеров поступают следующим образом: одним штуцером открывают доступ в распределительную камеру, из которой через панель с нужным количеством отверстий жидкость поступает к охлаждаемому объекту). Опыт показал, что для получения тока жидкости, равномерного по всей ширине канала, не-

обходимо на каждые 40…50 мм его ширины устанавливать один штуцер (рис. 2.8).

В некоторых случаях для получения качественного заполнения в схему системы охлаждения включают водоструйный элемент (насос). Работа такой системы осуществляется следующим образом.

Перед заполнением лазера жидкостным хладоагентом заполняется часть нагнетательного трубопровода, заключенная между вентилями 7 и 8 (рис. 2.9). Для этого переключающий вентиль 7 устанавливается в положение, при котором он отключает вход водоструйного элемента от нагнетательного трубопровода системы, а переключающий вентиль 8 — в положение, отключающее камеру лазера от вакуумирующей трубки водоструйного элемента. Затем включается нагнетательный насос, который обеспечивает циркуляцию хладагента в замкнутом контуре, состоящем из бака, нагнетательного трубопровода, двух вентилей, вакуумирующей трубки и приемной камеры водоструйного элемента (на рис. 2.9 этот контур отмечен штрих-пунктирными стрелками). Нагнетательный элемент остается включенным до тех пор, пока в резервуаре не перестанут появляться газовые пузыри. Затем вентили 7 и 8 устанавливаются в положение, показанное на рис. 2.9.

После включения насоса 5 начинается процесс заполнения системы. Поток хладагента устремляется через водоструйный элемент. Силой поверхностного трения жидкостный поток увлекает за собой частицы воздуха, находящиеся в приемной камере водоструйного элемента, создавая тем самым разрежение, достаточное для засасывания воздуха из головки лазера. Как только в тракте охлаждения элементов осветительной камеры лазера возникает небольшое разрежение, хладагент из бака начнет подниматься по сливному трубопроводу 4 в камеру лазера под действием разности давления в камере и атмосферного давления над уровнем жидкости в баке. Скорость заполнения тракта охлаждения лазера регулируется скоростью откачки, т. е. расходом жидкости в водоструйном элементе, и выбирается такой, чтобы исключить возможность образования пузырей. Заполнив тракт охлаждения лазера, хладагент поступит в вентиль и вакуумную трубку, затем перельется в водоструй-

ный элемент, в резуль-тате система окажется полностью заполненной хладагентом. После этого сначала вентиль 8, а затем вентиль 7 устанавливаются в положения, при которых они открывают нагнетательный трубопровод и отключают водоструйный элемент от системы охлаждения. Система охлаждения переходит в рабочий режим, при котором жидкостный хладагент циркулирует в замкнутом контуре, содержащем бак, насос, нагнетательный трубопровод, вентили и тракты осветительной камеры (на рис. 2.9 этот контур обозначен сплошными стрелками).

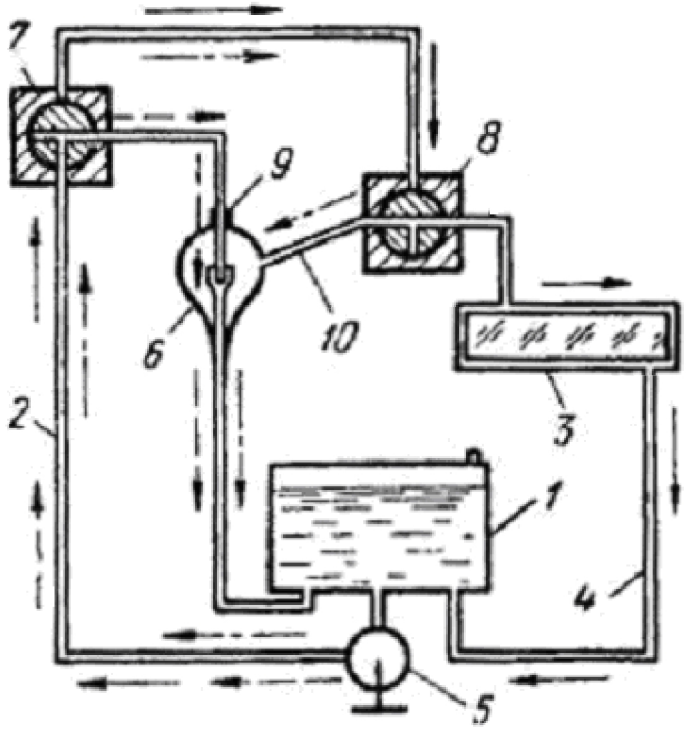


Рис. 2.9. Схема заполнения жидкостного контура системы охлаждения с помощью водоструйного элемента:
1 - бак; 2, 4 - соединительные трубопроводы; 3 - камера оптического элемента; 5 - насос; 6 - приемная камера; 7, 8 - вентили; 9 - входной штуцер; 10 - вакуумирующая трубка

Другими причинами появления газовых включений в системе являются: кипение жидкости на теплоотдающих поверхностях, фотохимическое разложение охлаждающей жидкости с образованием газообразных продуктов распада, выделения из жидкости растворенных в ней газов, вскипания охлаждающей жидкости на различного происхождения поглощающих включениях при облучении их световым потоком высокой интенсивности. Весьма эффек-

тивными мерами по устранению пузырей такой природы являются рациональные подготовка охлаждающей жидкости к заправке (дегазация) и заправка системы охлаждения.

Наибольшее распространение для закрытых, т.е. с изоляцией жидкости от контакта с окружающей средой, систем получил способ заправки, основанный на использовании закона Генри. Согласно закону Генри при постоянной температуре весовое количество газа, растворенного в данной жидкости, пропорционально его парциальному давлению над раствором: $G = \chi_г \cdot P_г$, где G — равновесное весовое количество растворенного газа, мг/л; $P_г$ — парциальное давление данного газа, ата; $\chi_г$ — коэффициент весовой растворимости, мг/(л·ата), зависит от температуры и рода жидкости и определяется экспериментально.

Для всех комбинаций газ — жидкость с уменьшением парциального давления количество газа, которое равновесно может быть растворено в ней, уменьшается. При увеличении давления растворимость газа в жидкости увеличивается. Заправка жидкостного контура хладагентом может производиться следующим образом (см. схему на рис. 2.10). К незаправленной системе охлаждения при помощи шлангов 14 и клапанов 6 подсоединяется специальный заправщик. Кран 5 системы перекрывается, включается насос 13 и производится заполнение жидкостного контура системы хладагентом из бака 7. Кран 9 при этом открыт.

После окончания заполнения, что контролируется по отсутствию в смотровой трубке 12 обильных воздушных пузырей, кран 9 закрывается, включается вакуумный насос 10 и с помощью вентиля 11 в баке 7 создается давление, близкое к давлению насыщения хладагента при температуре, замеряемой термометром 15. Затем включается циркуляционный насос системы 3 и дросселем 16 в жидкостном контуре устанавливается давление выше атмосферного, ограничиваемое работоспособностью его агрегатов и деталей и обеспечиваемое совместной работой насосов 13 и 3 при расходе жидкости через систему, соответствующем кратности циркуляции не менее 40 - 60 1/ч. Об окончании заправки судят по отсутствию воздушных пузырей в смотровой трубке 12, за-

тем выключаются насосы 13, 3 и 10, открывается кран 9, давление в контуре восстанавливается до атмосферного, разъединяются клапаны 6 и открывается кран 5, после чего система заправлена и готова к эксплуатации.

При последовательности действий, изложенных выше, заправка жидкостного контура системы охлаждения дегазированным хладоагентом обеспечивается тем, что в баке 7 жидкость находится при малом давлении, что в

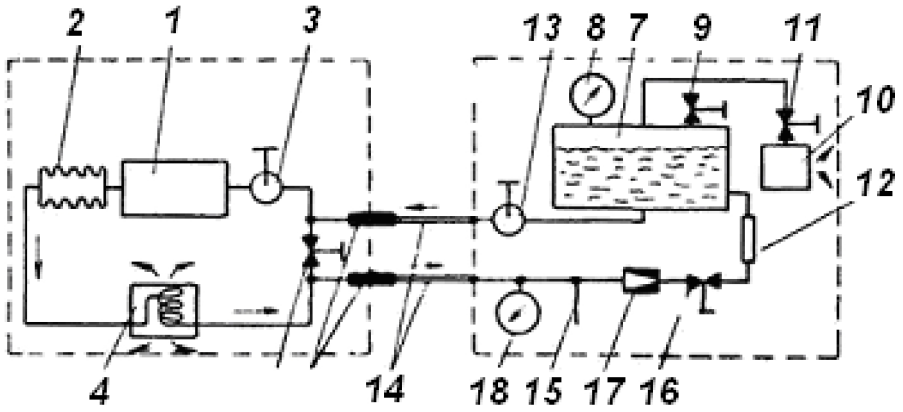


Рис. 2.10. Схема заправки жидкостного контура закрытой системы охлаждения:
1 - камера оптического элемента; 2 - компенсационный бачок; 3 - насос; 4 - теплообменник; 5 - перекрывной кран; 6 - заправочный клапан с запорным устройством; 7 - дегазационный бак заправщика; 8 - вакуумметр; 9 - атмосферный кран; 10 - вакуумный насос; 11 - вентиль; 12 - смотровая трубка; 13 - заправочный насос; 14 - соединительные трубопроводы; 15 - термометр; 16 - регулируемый дроссель; 17 - дроссель; 18 - манометр

соответствии с законом растворимости газов в жидкостях приводит к уменьшению содержания воздуха и других газов в хладагенте. После повышения давления насосами 13 и 3 растворяющая способность хладагента возрастает, что обеспечивает растворение воздуха, оставшегося в жидкостном контуре. После дросселя 16 давление в тракте уменьшается, растворенный воздух выделяется из хладагента, и цикл повторяется вновь. После удаления из жидкостного контура всего воздуха степень загазованности жидкости при циркуляции в контуре не изменяется и становится равной загазованности жидкости в баке заправщика, в котором производится его дегазация. Последнее обстоятельство обеспечивает заправку системы охлаждения дегазированным хладагентом.

Описанная методика позволяет эксплуатировать системы охлаждения при значительном колебании в них температуры и давления без появления в охлаждающей жидкости газовоздушных включений. Так, например, если жидкостный контур системы был заправлен водой при температуре +30° С и давлении дегазации 0,28 ата, то для того чтобы из воды при давлении 1 ата начал выделяться растворенный в ней воздух, температура воды должна быть такой, при которой $\chi_г$ = 5,17 мг/(л•ата), что соответствует температуре выше 100° С.

Включение нагнетательного элемента. Если профиль канала тракта охлаждения по ходу движения жидкости резко изменяется, то в момент включения нагнетательного элемента фронт наступающего потока разбивается на отдельные капли. При этом происходит интенсивное перемешивание жидкости и воздуха. Первые порции жидкости, поступающие в камеру, несут в своей массе значительное количество пузырей, которые не успевают покинуть осветительную камеру лазера до перекрывания выходного отверстия и прижимаются к стенкам канала при установлении режима течения жидкости. Устранить это явление можно уменьшением начальной скорости потока путем плавного или ступенчатого увеличения скорости вращения ротора приводного насоса циркуляции.

Явление кавитации. Кавитация (нарушение сплошности текущей жидкости) возникает в тех участках потока, где сумма гидродинамического и гидростатического давлений достигает некоторого критического значения. Такими участками могут быть сопла и расширения канала, вызывающие скачкообразные изменения скорости течения жидкости. При этом присутствующие в жидкости включения газа приобретают способность к значительному росту и превращению в «кавитационные пузыри». Перемещаясь с потоком, пузыри растут, а затем, попадая в область меньших скоростей и повышенных давлений, постепенно сокращаются и исчезают. При возникновении кавитации в трубопроводах сопротивление их значительно возрастает, а пропускная способность соответственно уменьшается. При небольших сечениях каналов и трубопроводов образуются газовые пробки и движение жидкостно-газовых

фаз происходит чередующимися импульсами. В жидкостной системе охлаждения с замкнутым контуром «кавитационноопасным» местом является переход жидкости из бака, где она собирается и хранится, в полость колеса нагнетательного насоса. При недостаточном гидростатическом давлении или несоответствующем проходном сечении канала из бака в полость колеса поступление жидкости к насосу может оказаться недостаточным, при этом происходит разрыв потока (кавитация). Кавитационные пузыри можно наблюдать в стеклянной трубке, включенной в тракт охлаждения на выходе из насоса при плавном перекрывании входного отверстия из бака в полость насоса.

В рассматриваемом случае явление кавитации можно предотвратить расширением входного канала к насосу и увеличением гидростатического давления в баке.

Герметичность трактов. Одной из причин появления пузырей в камерах лазера является подсос воздуха при неплотном соединении элементов тракта охлаждения. Отсутствие подтекания жидкости еще не означает, что сборка тракта герметична. При незатянутых сальниках можно наблюдать вереницу мелких пузырьков в месте, где сборка неплотная. Явление подсоса исчезает при более тщательной сборке тракта и уплотняющих сальников.

При скорости течения жидкости менее 1 м/с газовые пузыри, возникающие по разным причинам, могут задерживаться в зазорах между активным телом и защитной трубкой. Повышение скорости течения жидкости в каналах лазера способствует освобождению их от газовых пузырей. Для повышения скорости течения (а при постоянстве сечения каналов охлаждения в камерах это эквивалентно увеличению расхода жидкости) следует согласовать конструкцию системы охлаждения с напорной характеристикой нагнетательного элемента: увеличить внутренний диаметр трубок теплообменника, увеличить внутренний диаметр подводящих шлангов и диаметр штуцеров и т. п.

2.3. Газовые системы охлаждения

Газовые системы охлаждения значительно уступают по своей эффективности жидкостным, и, тем не менее, они находят широкое распространение в

квантовом приборостроении. Это связано с тем, что при их применении отпадает необходимость в герметизации трубопроводов, сальниковых уплотнений, использовании дорогих антикоррозийных материалов; при этом повышается надежность работы всего прибора.

Из газовых систем охлаждения элементов лазеров наибольшее распространение получили системы воздушного охлаждения [Лазеры Ланцет-1, Ланцет-2]. Такие системы существуют в двух вариантах: автономные (рис. 2.11) и неавтономные. Автономность системы охлаждения предполагает наличие собственного источника сжатого воздуха (компрессор, вентилятор, воздуходувка), поэтому такие системы могут функционировать как в помещении, так и в полевых условиях. Неавтономные блоки охлаждения подключаются к магистрали сжатого воздуха. Охлаждение воздуха и в том и в другом случае первоначально осуществляется с помощью холодильных агрегатов. Кроме того, автономные системы вполне могут функционировать в неавтономном режиме при наличии соответствующего обеспечения в месте расположения лазерного изделия.

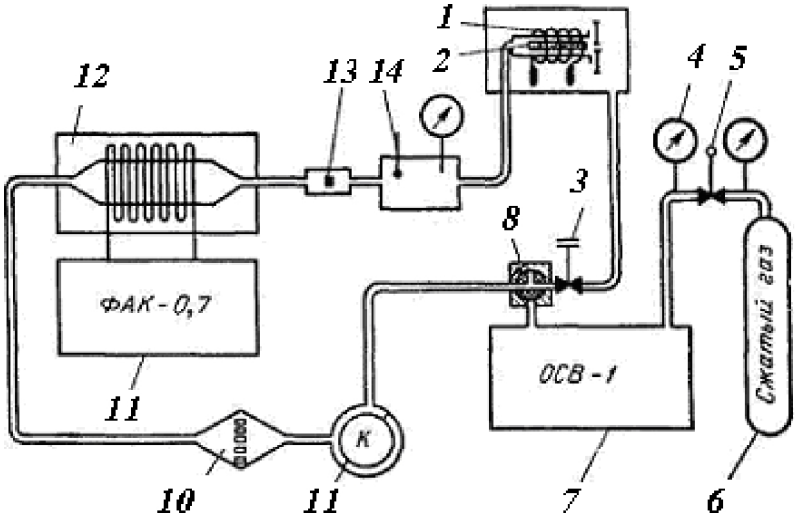


Рис. 2.11. Автономная многоконтурная воздушная система охлаждения:
1 - лампа накачки; 2 - активное тело; 3 - клапан; 4 - манометр; 5 - регулятор давления, 6 - баллон; 7 - машина осушки; 8 - кран; 9 - компрессор; 10 - фильтр; 11 - холодильный агрегат; 12 - теплообменник; 13 - расходомер; 14 - термометр

В газовых системах охлаждения находит применение продольное и поперечное обтекание активного элемента лазерного излучателя (рис. 2.12). Как уже указывалось, эффективность воздушных систем охлаждения весьма ограничен

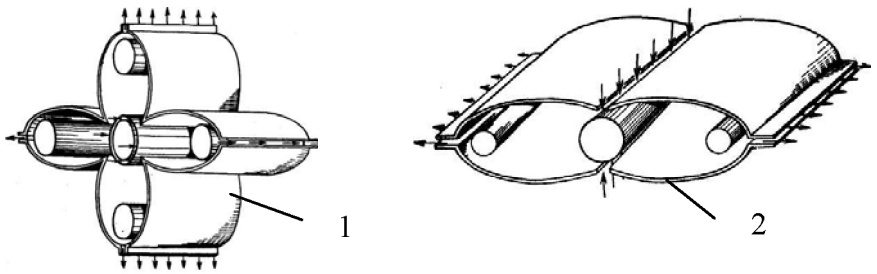


Рис. 2.12. Распределение газовых потоков в камерах лазеров:
1 - продольное обтекание активного тела; 2 - поперечное обтекание активного тела

на (коэффициенты теплообмена в камерах лазерного излучателя не превышают величины 100 - 150 Вт/(м^2·град)). Поэтому распределению газовых потоков в камерах уделяется особое внимание. В работе [6] сравнивались два варианта: поперечное обтекание цилиндрического активного тела и продольное. Было установлено, что с увеличением диаметра d активного тела эффективность поперечного обтекания уменьшается и при $d > 15$ мм может значительно уступать продольному. Исходя из этого, обычно в приборах с цилиндрическим активным телом диаметром до 15 мм применяют поперечную схему распределения потоков в камере, а при диаметре активного тела более 15 мм предпочтительнее продольная схема. Вопрос о распределении потоков при охлаждении ламп обычно решается из конструктивных соображений.

Схема автономной замкнутой системы приведена на рис. 2.11. К контуру подключается устройство для заполнения контура сухим газом, состоящее из баллона и устройства осушки. Компрессор нагнетает газ через пылеулавливающий фильтр в теплообменник холодильного агрегата. Охлажденный до определенной температуры газ проходит в камеру прибора, омывает лампу накачки и активное тело, отбирая выделяющееся в них тепло, и возвращается компрессор. Далее цикл повторяется.

Описанные выше газовые системы весьма громоздки и составляют существенную часть веса всего прибора. Работы по созданию малогабаритных блоков газового охлаждения привели к построению систем охлаждения, основанных на использовании вихревого эффекта.

Вихревой воздухоохладитель. Вихревой воздухоохладитель [7] разрабатывался для оптических квантовых генераторов с неавтономными системами охлаждения. Он прост в изготовлении и эксплуатации, в нем отсутствуют вращающиеся быстроизнашивающиеся детали, он не нуждается в периодическом осмотре квалифицированными специалистами. Кроме того, в нем весьма просто осуществляется регулирование температуры и при необходимости процесс регулирования может быть автоматизирован.

Принцип работы вихревого воздухоохладителя основан на эффекте Ранка энергетического разделения газа и заключается в следующем. При втекании газа в гладкую цилиндрическую трубу (рис. 2.13) через тангенциальное сопло и улитку образуется интенсивный круговой поток, приосевые слои которого заметно охлаждаются и через отверстие диафрагмы отводятся в виде холодного потока, а периферийные слои подогреваются и вытекают через дроссель в виде горячего потока. По мере прикрытия дросселя общий уровень давления в вихревой трубе повышается, и расход холодного потока через отверстие диафрагмы увеличивается при соответствующем уменьшении расхода горячего потока. При этом температуры холодного и горячего потоков также изменяются.

Вихревой воздухоохладитель обеспечивает температуру выдаваемого воздуха 0 - 5°С при снижении давления питающего воздуха до 3 кг/см^2 (с соответствующим уменьшением расхода выдаваемого воздуха). При снижении расхода холодного потока воздуха температура холодного потока понижается: при расходе 25—30 *м /час* температура —5° С. Максимальное понижение температуры холодного потока воздуха достигает уровня от — 20 до — 30°С. Однако вихревые охладители имеют сравнительно низкий коэффициент полезного действия, что ограничивает их применение.

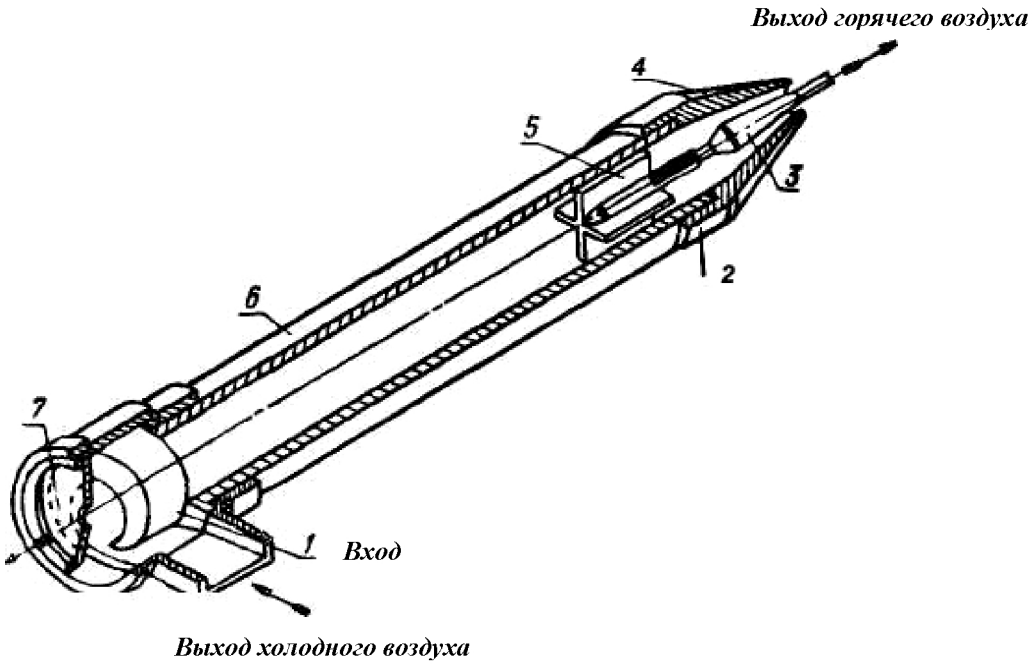


Рис. 2.13. Схема вихревой трубки:
1 - сопло-улитка; 2, 3, 4, 5 - дроссели; 6 - трубка; 7 - диафрагма

Вихревое охлаждение активного тела твердотельного лазера. Вихревое охлаждение активного тела твердотельного лазера позволяет реализовать систему охлаждения минимальных габаритов и веса. При этом эффективность охлаждения по сравнению с описанными выше газовыми системами охлаждении возрастает в 3…8 раз. Схема компоновки твердотельного лазера в сочетании с вихревой трубой приведена на рис. 2.14. Принцип эффективного охлаждения активного тела и импульсной лампы в этой схеме также основан на вихревом эффекте.

Активное тело помещается в оправах на оси вихревой трубы, цилиндрическая часть которой изготовлена из прозрачного материала (кварца, стекла). В корпусе вихревой трубы установлено тангенциальное сопло-улитка, внутренняя часть которого выполнена по спирали Архимеда. На противоположном конце трубы находится раскруточный щелевой диффузор, образованный двумя дисками.

Сжатый воздух из внешней сети поступает через подводящий патрубок в сопло-улитку. Образовавшийся воздушный вихрь движется в осевом направ-

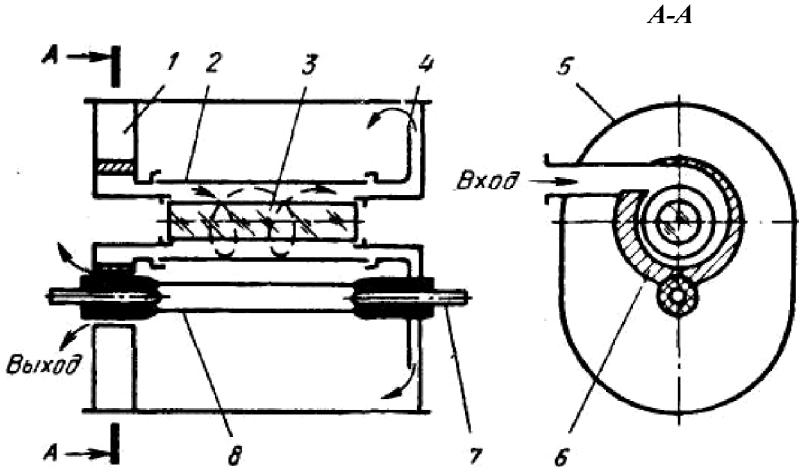


Рис. 2.14. Осветитель твердотельного лазера с вихревым охлаждением активного тела: 1 - корпус; 2 - вихревая труба; 3 - активное тело; 4 - диффузор; 5 - отражатель; 6 - улитка; 7 - электроды; 8 - лампа накачки

лении вдоль вихревой трубы к диффузору. Интенсивная закрутка воздушного потока создает значительный градиент статического давления по радиусу и высокую турбулентность в вихревой трубе, вследствие чего в центральной ее части создается зона пониженного давления и температуры. Наличие раскруточного диффузора позволяет увеличить степень расширения воздуха в вихревой трубе, что способствует снижению температуры в осевой зоне, где расположено активное тело. Высокая турбулентность вихря обеспечивает большую теплоотдачу от поверхности активного тела.

Отработанный воздух из диффузора поступает внутрь отражателя, охлаждает лампу накачки и выходит наружу. Отсутствие тепловой изоляции вихревой трубы не сказывается на ее характеристиках, так как низкотемпературная зона в центре вихря отделяется от стенок трубы периферийными слоями, имеющими температуру, близкую к окружающей. Эта же особенность исключает запотевание наружных стенок трубы.

На рис. 2.15 приведены результаты исследований, выполненные при различных давлениях сжатого воздуха P_1 и постоянной его температуре T_1 на входе. Введение относительного диаметра $\bar{d} = d/D$ (где D – диаметр вихревой трубы; d – диаметр отверстия диафрагмы) позволяет использовать эти данные

для труб и тел различных размеров. Из рис. 2.15 следует возможность охлаждения цилиндрического тела ниже - 100° С при давлении сжатого воздуха 4 ата, что значительно превышает эффект идеальной турбины (при одинаковых условиях). Вихревая трубка с диффузором практически полностью безынерционна, т.е. уже в первый момент ее работы (после подачи сжатого воздуха) вокруг активного тела создается зона минимальной температуры. Быстрый выход на режим особенно важен при периодической работе, так как в этих условиях суммарный расход сжатого воздуха становится незначительным.

Благодаря конструктивной простоте, малым габаритам и эффективности вихревая труба с диффузором находит широкое применение для охлаждения активных тел твердотельного лазера различного назначения. Такая система используется, например, в твердотельном лазере ГОР 100 [3].

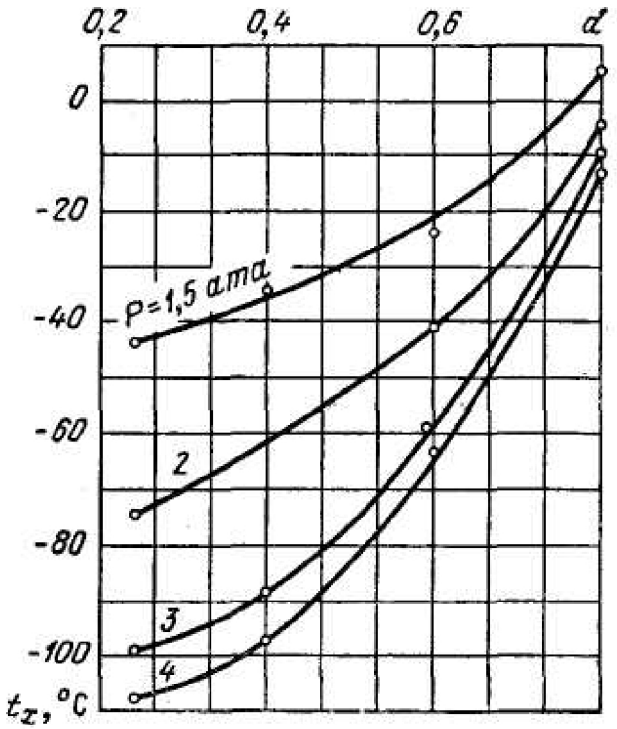


Рис. 2.15. Зависимость эффекта охлаждения от относительного диаметра оптического элемента при T_1 = 298 К

2.4. Контактное охлаждение

Рассмотренных выше способы охлаждения требуют выполнения ряда условий, таких, например, как повышенные требования к чистоте хладагента,

коррозийную устойчивость материалов тракта охлаждения, наличие соответствующих магистралей хладагента повышенного давления и т. п. Все это при определенных специфических обстоятельствах может затруднить применение рассмотренных выше схем охлаждения. В связи с этим получили распространение системы контактного охлаждения, в которых активный элемент соединен теплопроводной перегородкой (теплопроводом) с источником холода.

Контактные системы охлаждения классифицируются по способу охлаждения теплопровода. Известны системы с термоэлектрическим охлаждением и жидкостным охлаждением путем протока хладагента, по внутренним каналам в теплопроводе. К последнему типу относят системы с погружением основания теплопровода в объем хладагента.

Системы термоэлектрического охлаждения. Устройства охлаждения на основе модулей Пельтье часто называют активными термоэлектрическими элементами или активными элементами Пельтье. Такой кулер обычно состоит из термоэлектрического модуля, выполняющего функции теплового насоса, и понижающего температуру горячей стороны радиатора и охлаждающего вентилятора. На рис. 2.16 представлена схема активного кулера, в составе которого использован полупроводниковый термоэлектрический модуль. Системы термоэлектрического охлаждения теплопровода привлекают внимание конструкторов благодаря своим небольшим габаритам и весу, незначительной потребляемой мощности, возможности быстрого перехода из режима охлаждения в режим нагрева, малому времени выхода на режим и возможности работы в широком диапазоне окружающих температур, давлений, ускорений и вибраций. Недостатком термоэлектрического охлаждения является относительно низкая эффективность охлаждения, что определяет область их применения в лазере с малой энергией излучения, работающих в режиме посылки импульсов сериями.

На рис. 2.17 представлен один из вариантов оформления контактного тсплоотвода на базе термоэлектрической полупроводниковой батареи для твердотельного активного элемента цилиндрической формы. На активное

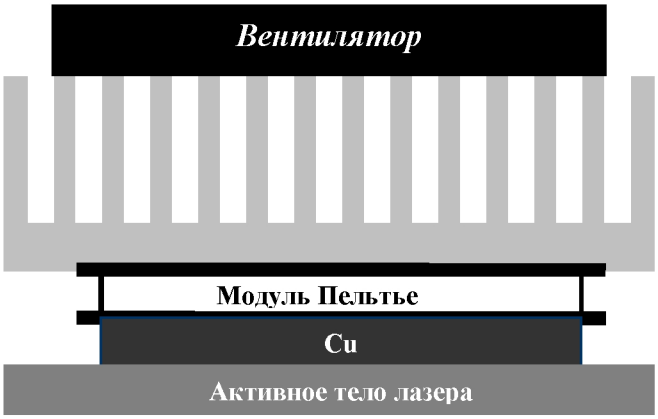


Рис. 2.16. Конструкция кулера с модулем Пельтье

кристаллическое тело лазера предварительно по образующей вжигается полоса сереребра. Затем активное тело припаивается легкоплавким припоем к теплопроводу из красной меди, который, в свою очередь, припаивается к коллектору холодных спаев термобатареи, состоящей из термоэлементов. Термобатарея с теплопроводом представляет собой конструктивно законченный узел, смонтированный на основании, которое одновременно является коллектором горячих спаев термобатареи. Теплоотвод от термобатареи может осуществляться на корпус камеры и далее на радиаторную систему. Электрическое питание термобатареи подается через две токоведущие шины.

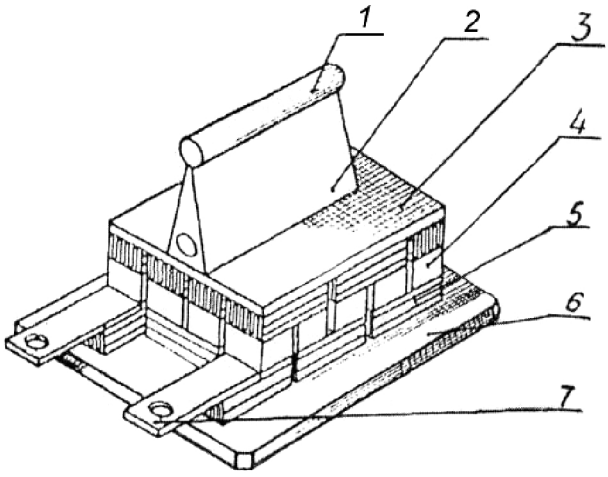


Рис. 2.17. Схема контактного термоэлектрического охлаждения:
1 - активное тело; 2 - теплопровод; 3 - коллектор холодных спаев; 4 - термоэлементы; 5 - теплопереходы, 6 - основание; 7 - шины

Тепло, выделяющееся в активном теле в процессе работы лазера, передается медной призме-теплопроводу путем теплопроводности активного тела в радиальном направлении. При выбранном конструктивном варианте системы охлаждения необходимо кроме теплотехнических параметров батареи учитывать также массу, объемную теплоемкость и теплопроводность материала теплопровода, который играет весьма существенную роль в процессе отвода тепла от активного тела лазера.

Особенности эксплуатации. Полупроводниковые термоэлектрические модули Пельтье, применяемые в средствах охлаждения электронных элементов, отличаются сравнительно высокой надежностью. В отличие от холодильников, созданных по традиционной технологии, они не имеют движущихся частей. Для достижения необходимой хладопроизводительности допускается каскадное включение модулей Пельтье, что позволяет довести температуру корпусов электронных элементов до отрицательных значений даже при значительной мощности рассеяния.

Однако, кроме очевидных преимуществ, модули Пельтье обладают и рядом специфических свойств, которые необходимо учитывать при их использовании в составе охлаждающих средств.

Тепловыделение. Термоэлектрические модули отличаются относительно низким холодильным коэффициентом и, выполняя функции теплового насоса, сами становятся мощными источниками тепла. Использование их в составе средств охлаждения вызывает значительный рост температуры внутри лазера. Это означает, что требуются дополнительные средства для снижения температуры, в частности, радиаторы и вентиляторы в конструкции корпуса, улучшающие теплообмен с окружающей средой.

С другой стороны, в процессе работы элементов Пельтье избыточной мощности устанавливаются низкие температуры, способствующие конденсации влаги из воздуха. Это представляет опасность для электронных компонентов, так как конденсат может вызвать короткие замыкания между элементами. Чтобы избежать этого, нужно подбирать элементы Пельтье оптимальной мощности. Произойдет конденсация или нет, зависит от нескольких пара-

метров, из которых наибольшее значение имеют температура окружающей среды (в данном случае воздуха внутри корпуса лазера), температура охлаждаемого объекта и влажность воздуха. Чем теплее воздух внутри корпуса и чем больше его влажность, тем вероятнее конденсация влаги.

Модули Пельтье также создают сравнительно большую дополнительную нагрузку на блок питания лазера - учитывая значения потребляемого ими тока, мощность блока питания должна быть не менее 300 Вт. В случае выхода из строя модуль Пельтье изолирует охлаждаемый элемент от радиатора модуля Это очень быстро приводит к нарушению теплового режима защищаемого элемента и его перегреву. Поэтому целесообразно использовать качественные модули от известных производителей. Такие модули обладают высокой надежностью, ресурс их работы нередко превышает 1 млн. час.

Жидкостное охлаждение теплопровода. При жидкостном охлаждении теплопровода удастся резко повысить эффективность системы охлаждения путем уменьшения теплового сопротивления «активное тело — хладагент» и реализации протока хладагента по каналам в теплопроводе.

В качестве хладагента (теплопроводящей жидкости) могут использоваться: вода, жидкости с низкой температурой замерзания (антифризы), жидкий и газообразный азот, фреон и др., - т. е. активное тело в предлагаемой конструкции может работать в широком диапазоне температур.

При конструировании контактных систем охлаждения возникают вопросы, связанные с определением площади теплового контакта и несимметричным теплоотводом оси активного тела лазера. А также эта эффективность использования модулей Пельтье зависит от выбора подходящей модели и установки соответствующих режимов ее эксплуатации.

2.5. Гетерофазное охлаждение

В публикации [8] предлагается иной способ достижения криогенных температур, пригодный для ЭИ СО лазеров квазизамкнутого цикла. Сжиженные компоненты лазерной смеси *($CO:N_2$, $CO:N_2:Ar$)* в виде мелкодисперсных частиц инжектируются в газовый поток 1 (рис. 2.18) перед активным объемом

2 и охлаждают газ до необходимых температур T_0 на входе электроразрядного промежутка за счет теплоты испарения. При достаточно малом размере впрыскиваемых капель удается решить сразу две технически сложных задачи — без теплообменника понизить температуру газового потока до $T_0=100\ K$ и произвести быструю газификацию жидкофазной смеси. После прохождения активного объема часть расхода 3, равная расходу инжектируемой жидкости 4, удаляется из контура 5. Основным преимуществом такого способа являются уменьшение массогабаритных характеристик ЭИ CO-, CO_2-лазеров и увеличение ресурса работы при фиксированном запасе лазерной смеси.

Использование специальных форсунок, распылителей для инжекции жидкой лазерной смеси или отдельных ее компонентов, точное соблюдение баланса энергии жидкой фазы на всех этапах ее преобразования в холодный газ, и других способов, позволяющих трансформировать поток криогенной

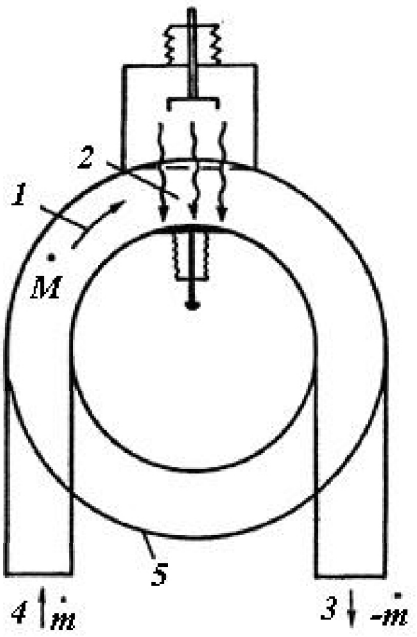


Рис. 2.18. Конструкция СО-ЭИЛ с инжекцией лазерной смеси в жидкой фазе:
1 - газовый поток с массовым расходом M, 2 - активный объем лазера, 3 - удаленная из контура часть газового расхода ($-m$), 4 - инжектируемая в контур жидкая лазерная смесь с массовым расходом m, 5 - газовый контур

жидкости в однородный поток охлажденного лазерного газа даст возможность достичь энергетических характеристик, предельных для CO-, CO_2-лазеров.

2.6. Гибридные системы охлаждения

Как описано в предыдущих пунктах этой главы для охлаждения лазера используются различные системы, основанные на применении воздушного, жидкостного, кондуктивного, термоэлектрического, испарительного и других методов охлаждения. Среди них большой экономичностью, малыми габаритными размерами, простотой и точностью поддержания температуры на заданном уровне отличаются системы, основанные на использовании обратимых эндотермических процессов плавления, сопровождающихся поглощением тепла на границе раздела твердой и жидкой фаз.

Конструктивно такие системы охлаждения выполняются в виде контейнера [9], заполненного рабочим веществом, температура плавления которого совпадает с температурой стабилизации активного элемента лазера. Главной недостатком таких систем, ограничивающих их применение для охлаждения активного элемента лазера с высокими мощностями рассеивания, является необходимость поддерживания рабочего вещества в состоянии фазового перехода на протяжении всего цикла работы радиоэлектронного прибора. Так как лазер в течение времени своего функционирования может выделять значительные мощности, то во многих случаях теплоаккумулирующей способности рабочего вещества оказывается недостаточно для обеспечения требуемого температурного режима на протяжении всего цикла его работы (в определенный момент времени работы лазера рабочее вещество полностью расплавится). В результате этого необходимый температурный режим работы лазера нарушается и может произойти срыв генерации излучения.

В связи с этим, технически возможно для охлаждения лазеров с применением плавящихся рабочих веществ использовать дополнительную охлаждающую систему для отвода избытка тепла от рабочего агента. В качестве такой дополнительной системы охлаждения весьма эффективным является применение, описанных в п. 2.5, термоэлектрических батарей (ТЭБ).

На рис. 2.19 показана конструкция системы, которая состоит из тонкостенной металлической емкости 1, заполненной рабочим веществом 2, темпе-

ратура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации полупроводникового лазера или газоразрядной трубки 3. Металлическая емкость верхней поверхностью находится в контакте с активным элементом, к нижней поверхности емкости присоединена своим теплопоглощающим спаем ТЭБ 4, состоящая из нескольких последовательно соединенных секций термоэлементов. Своим тепловыделяющим спаем ТЭБ приведена в тепловой контакт с воздушным теплообменником 5. В объеме металлической емкости 1 с рабочим веществом 2 размещены датчики температуры 6, число которых равно числу секций термоэлементов в ТЭБ 4. Сигналы датчиков поступают на входы устройства управления 7, выход которого электрически связан с ТЭБ 4. Связь устройства управления 7 с ТЭБ 4 осуществляется таким образом, чтобы имелась возможность последовательного подключения или отключения каждой из секции термоэлементов. Для снижения до минимума влияния колебаний температуры окружающей среды применяется слой теплоизоляции 8.

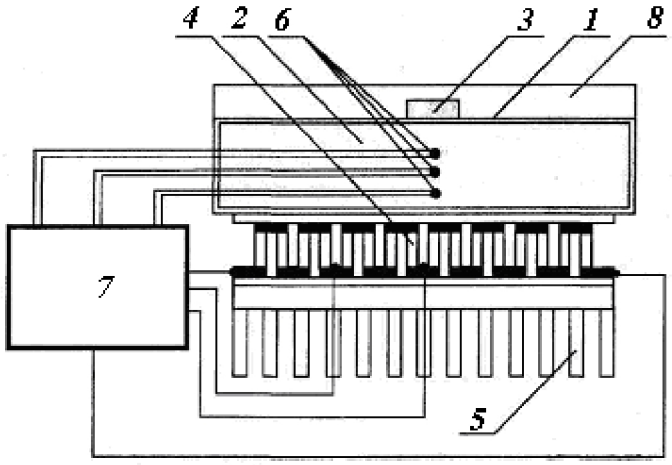


Рис. 2.19. Гибридная система охлаждения активного элемента:
1 - тонкостенная металлическая емкость; 2 - рабочее вещество; 3 - охлаждаемый элемент; 4 - термоэлектрическая батарея; 5 - воздушный теплообменник; 6 - датчики температуры; 7 - устройство управления термоэлектрической батареи; 8 - теплоизоляция

Работа системы осуществляется следующим образом. Тепло, поступающее от полупроводникового лазера 3, передается металлической емкости 1 и через поверхность соприкосновения — рабочему веществу 2, которое нагре-

вается до температуры плавления. Процесс плавления связан с появлением жидкой фазы рабочего вещества 2 и ее перемещением в направлении термоэлектрической батареи 3. В результате температура тонкостенной металлической емкости и соответственно температура элемента 3 будет поддерживаться постоянной, равной температуре плавления рабочего вещества.

До тех пор, пока жидкая фаза расплавленного рабочего вещества 2 не достигнет места расположения первого датчика температуры 6 ток через элементы ТЭБ 4 не протекает и отвод тепла не осуществляется. При проплавлении рабочего вещества 2 до места расположения первого датчика температуры 6, с последнего передается электрический сигнал на устройство управления 7. В результате крайняя секция термоэлементов ТЭБ 4 подключается к источнику электрической энергии. Часть ТЭБ 4, состоящая из термоэлементов крайней секции, начинает интенсивно отводить тепло от тонкостенной металлической емкости 7. При увеличении мощности рассеяния тепла полупроводникового лазера 3 жидкая фаза расплавленного рабочего вещества достигает второго датчика температуры 6. В соответствии с поступившим с него электрическим сигналом устройство управления 7 начинает осуществлять питание следующей секции термоэлементов ТЭБ. При этом отвод тепла от металлической емкости будет осуществляться уже двумя секциями ТЭБ. При еще большем увеличении мощности рассеяния тепла полупроводникового лазера посредством датчиков температуры 6 и устройства управления 7 к процессу теплоотвода будут подключаться последовательно следующие секции термоэлементов батареи.

Процесс последовательного подключения секций термоэлементов и, следовательно, увеличения уровня теплоотвода от тонкостенной металлической емкости 1 будет осуществляться до тех пор, пока граница раздела жидкой и твердой фаз рабочего вещества 2 не стабилизируется на определенном уровне. При уменьшении уровня тепловыделений элемента полупроводникового лазера 3 за счет отвода тепла ТЭБ 4 жидкая фаза рабочего вещества 2 будет перемещаться в обратном направлении (в направлении элемента полупроводникового лазера 3*)*. При этом устройство управления 7 в зависимости от элек-

трических сигналов с датчиков температуры 6, до которых переместилась твердая фаза рабочего вещества 2, будет последовательно отключать секции термоэлементов ТЭБ 4. Последовательное подключение и отключение секций термоэлементов ТЭБ способствует повышению экономичности системы термостабилизации.

Система термостабилизации, представленная на рис. 2.20, предназначена для одновременной стабилизации температуры нескольких объектов, имеющих разные рабочие температуры. Подобная система может быть использована, например, для термостабилизации импульсных диодов накачки твердотельных лазеров.

Система состоит из тонкостенной металлической емкости 1, разделенной в горизонтальной плоскости перегородками 2 из теплоизоляционного материала на изолированные отсеки 3 (число которых соответствует количеству диодов

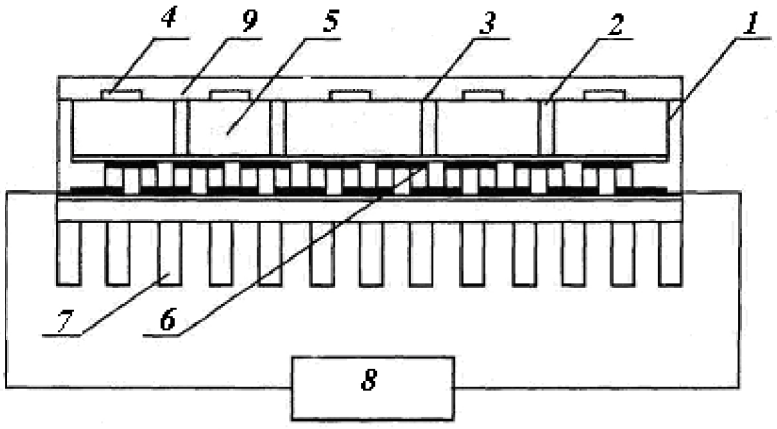


Рис. 2.20. Гибридная система охлаждения группы элементов:
1 - тонкостенная металлическая емкость; 2 - теплоизоляционные перегородки; 3 - теплоизолированные отсеки; 4 - охлаждаемые элементы; 5 - термостабилизирующее вещество; 6 - термоэлектрическая батарея; 7 - воздушный теплообменник; 8 - источник электропитания

накачки твердотельного лазера 4), заполненные термостабилизирующими веществами 5, температуры плавления которых обеспечивают требуемые рабочие температуры объектов термостабилизации. Диоды 4 установлены на верхней поверхности отсеков 3 таким образом, чтобы рабочая температура

каждого объекта совпадала с температурой плавления термостабилизирующего вещества 5, заполняющего данный отсек 3. К нижней поверхности отсеков (противоположной размещению объектов термостабилизации) присоединена своим теплопоглощающим спаем ТЭБ 6, приведенная своим тепловыделяющим спаем в тепловой контакт с воздушным теплообменником 7 и питаемая электрическим током от источника электрической энергии 8. Слой теплоизоляции 9 применяется для снижения до минимума влияния колебаний температуры окружающей среды.

Для обеспечения в течение определенного интервала времени требуемой рабочей температуры каждого из объектов термостабилизации необходимо, чтобы объем соответствующего отсека составлял величину:

$$V_i = t \cdot \frac{P_i - S_i Q / S}{r_i \cdot \rho_i}, \qquad (2.1)$$

где V_i — объем i-го отсека, заполненного; i-м термостабилизирующим веществом; p_i — мощность тепловыделений i-го объекта; S_i — площадь нижней поверхности i-го отсека; Q — мощность, отводимая ТЭБ *6* от металлической емкости; S — площадь повехности металлической емкости; r_i и ρ_i — теплота плавления и плотность i-го термостабилизируюшего вещества.

Поглощение тепла, выделяемого лазером в цикле работы, производится за счет плавления термостабилизирующего вещества. Использование ТЭБ уменьшает количество термостабилизирующего вещества, требуемого для обеспечения заданного температурного режима работы объектов, а также повышает надежность функционирования системы.

3. ОХЛАЖДАЮЩИЕ СРЕДЫ

Не менее ответственным этапом разработки системы охлаждения является выбор охлаждающей среды, омывающей активные тела, лампы накачки и элементы осветительной системы.

Газовые среды. При выборе рода газа для циркуляции в контурах охлаждения и термостабилизации элементов лазера следует иметь в виду, что он должен обладать следующими качествами: высокими коэффициентами пропускания рабочих зон из спектра излучения ламп накачки, слабой химической активностью по отношению к материалам тракта охлаждения и элементам лазера, доступностью и безопасностью при эксплуатации. Наиболее распространенными агентами газовых систем охлаждения являются воздух и азот. Азот применяют исключительно в замкнутых контурах и при продувке трактов охлаждения. Азот поставляется в специальных баллонах высокого давления (150 или 400 кг/см^2) Источником воздуха являются магистрали общего назначения и собственные компрессоры, воздуходувки, вентиляторы.

Воздух, поступающий в камеру лазера, должен подвергаться специальной фильтрации от механических примесей, капель воды и масла. При выборе или разработке фильтра отправным методом является величина избыточного давления воздуха. Вентиляторы и воздуходувки создают поток воздуха с небольшим избыточным давлением, но не загрязняют его. В этом случае воздух фильтруют на входе в блоки охлаждения. Фильтром могут служить несколько слоев капроновой сетки или парашютного шелка.

Жидкостные среды. Жидкостные среды, применяемые в системах охлаждения ОКГ, должны иметь:

1. Спектральные и оптические характеристики, соответствующие применяемым лампам накачки и активным веществам.

2. Фотохимическую устойчивость к многократному световому воздействию высокой мощности.

3. Высокую теплоемкость и теплопроводность.

4. Наименьшее коррозирующее действие на детали системы охлаждения; отсутствие осадков при эксплуатации жидкости.

5. Возможно меньшие испаряемость и изменение объема при нагревании; устойчивую работу при повышенных температурах.

6. Низкую температуру замерзания в сочетании с небольшой вязкостью.

Кроме того, жидкость не должна ухудшать свою прозрачность, образовывать взрывоопасные и токсичные пары и смеси.

Из жидкостных систем охлаждения наибольшее распространение получили водяные системы. Это объясняется тем, что наряду с высокой стабильностью коэффициентов пропускания в области рабочих длин волн и способностью отфильтровать инфракрасную часть спектра, вода обладает хорошими теплофизическими характеристиками и позволяет реализовать эффективные термостабилизирующие и теплоотводящие системы. Кроме того, вода доступна и абсолютно безопасна в работе. Однако при использовании воды в качестве охлаждающей жидкости элементов лазеров важное значение имеет ее жесткость, особенно в случае разомкнутых систем при питании их от водопроводной магистрали.

При использовании воды в качестве теплоотводящей жидкости наибольшее внимание обращают на временную жесткость. Для удаления образовавшейся накипи па элементах тракта охлаждения рекомендуется их промывать 3 - 4%-ным раствором соляной кислоты. Положительный эффект в уменьшении выпадающих осадков дают ионитовые фильтры, которые в последнее время находят применение в замкнутых контурах водяных систем охлаждения. В этих фильтрах содержатся вещества - иониты, способные вступать в реакции обмена с находящимися в водных растворах катионами и анионами.

В замкнутой системе охлаждения употребляется дистиллированная или очищенная вода, благодаря чему исключается возможность появления накипи. Однако здесь проявляются факторы, вызывающие отложение осадка на стен-

ках тракта охлаждения. Непрерывная длительная циркуляция воды по замкнутому тракту приводит к образованию осадка. Он состоит из окислов металлов, использованных в системе охлаждения, а также из частиц резины, сорванных потоком воды с поверхности резиновых шлангов. Поэтому в водяных замкнутых контурах наряду с применением ионитовых и других фильтров, задерживающих взвешенные частицы, образующие осадок, рекомендуется периодическая смена воды.

В воде, прошедшей ионитовые фильтры, через некоторое время может снова появиться осадок. По этой причине в замкнутой системе целесообразно непрерывное или, по крайней мере, периодическое прохождение воды через указанные фильтры. Конструкция фильтров и их включение в схему охлаждения должны быть выполнены так, чтобы при применении фильтров общее гидравлическое сопротивление системы существенно не повышалось.

При работе лазерных установок на открытых площадках в зимнее время применяют низкозамерзающие жидкости: водоспиртовые, водоглицериновые и этиленгликолевые антифризы.

Водоспиртовые антифризы вполне удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям в отношении температуры замерзания. Для получения водоспиртового антифриза с температурой замерзания - 40°С необходимо, например, добавить к воде 60% этилового спирта (от общего объема охлаждающей среды). Недостатком является низкая температура их кипения, вследствие чего при эксплуатации спирты испаряются быстрее воды. В результате испарения происходит потеря спиртов и, следовательно, повышение температуры замерзания антифризов. Для предотвращения коррозии в антифризы добавляют антикоррозийные ингибиторы. В качестве ингибиторов в этиловый спирт добавляют 0,05 - 0,1% нитрита натрия *($NaNO_2$)* и 0,05 - 1,0% молибдата натрия (Na_2MoO_4).

Существенным недостатком водоспиртовых антифризов (табл. 3.2) является низкая температура их вспышки и воспламенения и способность образовывать легко воспламеняющиеся смеси с воздухом. В качестве материалов трактов охлаждения могут быть использованы алюминий и его сплавы, не-

ржавеющая сталь, силиконовая резина, полиэтилен, фторопласт. Не допускаются к применению медь и ее сплавы, различные смолы, резина, в том числе, вакуумная. Выбор конструкционных материалов определяет, в конечном итоге, надежность и долговременную стабильность системы охлаждения.

Высококачественными хладагентами являются водоглицериновые смеси. Для получения антифриза с температурой замерзания - 40°С необходимо добавить к воде 70% глицерина(от общего объема жидкости). Вследствие высокой температуры кипения глицерина его растворы с водой не имеют недостатков, свойственных водоспиртовым антифризам. К недостаткам водоглицериновых антифризов относят их способность легко вспениваться. Вспенивание резко ухудшает эффективность радиационного обмена в осветителе и теплопередачу. Отмеченный недостаток в сочетании со значительной вязкостью этих антифризов резко сокращает область их применения.

Свойства гликолевых антифризов, полученных из чистого этиленгликоля или пропиленгликоля и воды, определяются соотношением этих компонентов. Основанием этих хладагентов являются гликоли. Гликоли – это бесцветные сладковатые и высоко вязкие жидкости с точкой замерзания ниже - 5^0С. Различают два главных типа гликолей:

- пропиленгликоль - $C_3H_6(OH)_2$, благодаря нетоксичности находит также применение в пищевой промышленности (в качестве пищевых добавок).
- этиленгликоль, $C_2H_4(OH)_2$, в основном, используется там, где его утечка не будет опасной для людей. Он значительно дешевле пропиленгликоля и потери на трение намного ниже при низких температурах, чем для пропиленгликоля.

Известные тосолы 40 и 65 с температурой замерзания соответственно - 40 и - 65°С получаются при добавлении к воде соответственно 40 и 65% этиленгликоля (от общего объема).

Как пропиленгликоль, так и этиленгликоль имеют молекулярный размер меньший, чем у чистой воды. Это свойство может привести к образованию утечек в уплотнениях (особенно при низких температурах теплоносителя и

Таблица 3.1

Физико-химические характеристики водоспиртовых антифризов

Показатели	Антифриз		
	Марка 4К	Марка 40	Марка 65
Внешний вид	Светло-желтая мутная жидкость		
Цвет красителя	-	-	Оранжевый
Плотность при 20° С, г/см3	1,100-1,116	1,067-1,072	1,085-1,090
Температура кипения °С , не менее	-	-40	-60
Температура кипения °С , не менее	-	108	115
РН	8,5	8,5	8,5
Коэффициент преломления при 20° С	1,429-1,431	1,390	1,400
Теплоемкость Ср , кДж/(кгК), при температуре 55° С	-	3,290	3,120
Теплопроводность λ, Вт/(м·К), при температуре 55° С	-	0,406	0,358
Кинематическая вязкость $v \cdot 10^6$, $м^2/с$, при 60° С	-	1,25	1,8
Массовая доля компонентов, % этиленгликоля, не менее	94,0	52,0	64,0
Массовая доля компонентов, % воды, не менее	5,0	47,0	35,0
Массовая доля компонентов. % Декстрина, не менее	0,185	0,1	0,1
Массовая доля компонентов, % динатрийфосфата, не менее	0,44 - 0,56	0,25 - 0,35	0,3 - 0,35

высоких концентрациях гликоля) и требует более внимательного подхода к выбору насосного оборудования и его размещению. В ряде случаев стандартные насосы рассчитаны на максимальное содержание гликоля 30 - 40%, более высокие концентрации требуют замены стандартных уплотнений на специальные. По возможности, насосы следует размещать в частях системы с более высокой температурой теплоносителя. Не рекомендуется применять трубы из оцинкованной стали в системах с гликолевыми теплоносителями. Коррозирующее действие этиленгликолевых антифризов на детали системы охлажде-

ния примерно такое же, как и воды. В качестве ингибиторов коррозии в растворы добавляют кислый фосфорнокислый натрий (Na_2HPO_4) и декстрин.

Рекомендуемые материалы трактов охлаждения: алюминий, нержавеющая сталь, полиэтилен, фторопласт. При длительном соприкосновении тосола с медью и латунью цвет антифриза изменяется в сторону зелено-синей окраски. В пожарном отношении указанный антифриз безопасен. Попадание антифриза внутрь организма вызывает тяжелые отравления, хотя для кожи человека этиленгликоль безвреден. Поэтому при работе с этиленгликолевыми антифризами следует соблюдать особую осторожность и соответствующие правила техники безопасности.

В табл. 3.2 представлены основные характеристики тосола, этиленгликоля и его водных растворов. В качестве примера на рис. 3.1, 3.2 показаны рекомендуемые массовые концентрации растворов этиленгликоля и пропиленгликоля для различных температур теплоносителя показаны в диапазоне температур от + 5 до - 10 ^{o}C (как наиболее часто используемый диапазон температур в системах охлаждения лазеров).

С помощью данных графиков выбирается сначала рабочая температура (верхняя кривая), например на рис. 3.1, она равна 1,5 ^{o}C. Этой температуре соответствует концентрация гликоля около 19%. Температура замерзания определяется нижним графиком. Для этого от рабочей точки верхней кривой направить линию параллельную оси абсцисс (пунктирная линия со стрелкой на рис. 3.1) до пересечения с нижней кривой. На рис. 3.1 температура замерзания равна - 7^{0}C. При более низких температурах для расчета концентрации следует использовать диаграмму состояния раствора гликоля.

Таблица 3.2

Физико-химические характеристики тосола

Показатели	ТОСОЛ		
	ТОСОЛ - А	ТОСОЛ - А 40	ТОСОЛ - А 65
Внешний вид	Желто-зеленая жидкость		
Цвет красителя	-	Голубой	Красный
Плотность при 20° С, г/см^3	1,120-1,116	1,078-1,085	1,085- 1,095
Температура кипения °С , не менее	-	-40	-65
Температура кипения °С , не менее	170	108	115
РН	7,5 - 8,5	7,5 - 8,5	7,5 - 8,5
Коэффициент преломления при 20° С	1,435	1,390	-
Теплоемкость C_p , кДж/(кгК), при температуре 55° С	-	3,190	-
Теплопроводность λ, Вт/(м·К), при температуре 55° С	-	0,400	0,363
Кинематическая вязкость $v \cdot 10^6$, м^2/с, при 60° С	-	1,25	1,8
Массовая доля компонентов, % этиленгликоля, не менее	91,0	53,0	63,0
Массовая доля компонентов, % воды, не менее	3,0	44,0	33,0
Массовая доля компонентов, % антивспенивающей присадки, не менее	0,1	0,05	0,08
Массовая доля компонентов, % антикоррозийной, не менее	5,0	2,55	2,95

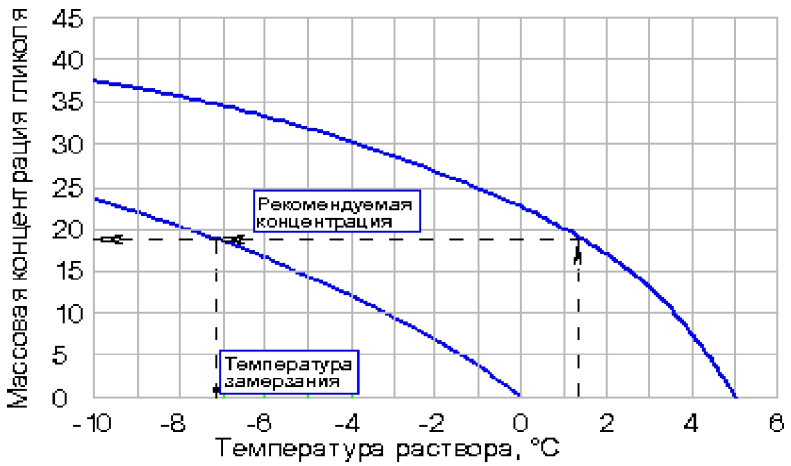


Рис. 3.1. Рекомендуемые концентрации раствора этиленгликоля

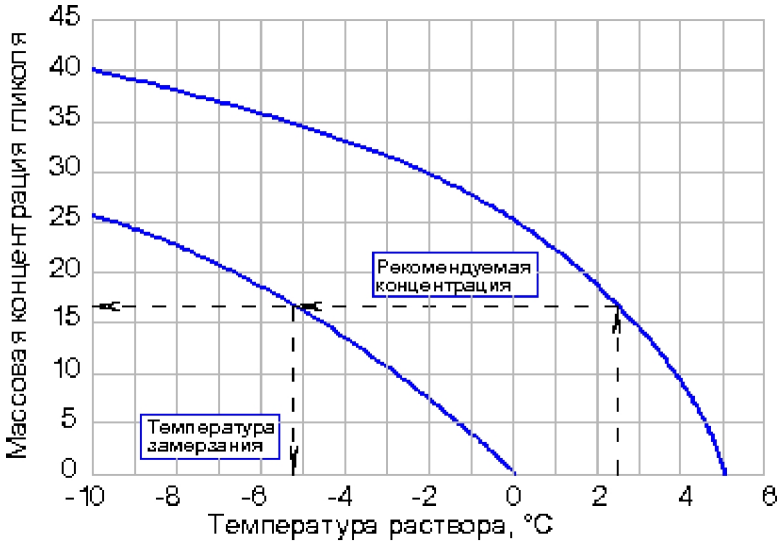


Рис. 3.2. Рекомендуемые концентрации раствора пропиленгликоля

4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНЫХ БЛОКОВ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Реализация схемы охлаждения лазера на основе холодильной машины требует введения в конструкцию лазерной установки дополнительных агрегатов, которые также становятся потребителями энергии и источниками тепла, причем последнее необходимо сбрасывать в окружающее пространство. Следовательно, прежде реализации такой системы охлаждения необходимо провести расчет баланса энергий и определить оптимальные температурные режимы работы лазерной установки, с целью достижения максимально возможного увеличения мощности излучения лазерной установки и одновременного увеличения ее эффективного КПД.

4.1. Энергетический баланс технологического комплекса CO_2-лазер – холодильная машина

Можно считать, что в пределе тепло, которое необходимо отводить от лазера составляет величину всей подводимой к лазеру мощности. Подобрав систему охлаждения, соответствующей холодопроизводительности и необходимые устройства для работы лазерной установки по такой схеме можно показать, что дополнительными источниками тепла, которое необходимо сбросить в окружающую среду являются: насос для прокачки вторичного хладоагента (тосола), компрессор холодильника, вентилятор конденсатора. Холодильному агрегату необходимо обеспечить изоляцию трубопроводов холодного контура и испарителя холодильника. Энергетический баланс и эффективный КПД лазерной установки будут выражены следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} \eta &= \frac{N_{ИЗЛ}}{N_{эл.пит}} \\ N_{эл.пит\ л.уст.} &= N_{ист.п} + N_{с.о.}\ ; \\ N_{с.о} &= N_K + N_{дв.вен} + N_{нас}\ ,\ ; \\ Q_{гор} &= Q_X + N_K + Q_{т.п} + Q_{нас,}\ ; \end{aligned}\right\} \qquad (4.1)$$

где η - эффективный КПД лазерного комплекса; $N_{эл.пит\ л.уст.}$ – суммарная мощность, подводимая к лазерной установке; $N_{ист.п}$ - мощность, подводимая к источнику питания лазера; $N_{с.о}$ - мощность, затрачиваемая на работу системы охлаждения; Q_X - холодопроизводительность холодильной машины; N_K - мощность компрессора; $Q_{т.п}$ - теплопритоки через изоляцию; $N_{дв.вен}$ - мощность привода вентиляторов; $N_{нас}$ - мощность насоса для прокачки хладоносителя; $Q_{нас}$ - тепловыделение внесенное в жидкостный контур работой насоса; $Q_{гор}$ - суммарное тепло, сбрасываемое в окружающую среду.

В результате расчетов [10, 11] для лазерной установки с холодильной машиной, необходимой для обеспечения необходимого уровня охлаждения были получены следующие данные: 1) мощность излучения растет с понижением температуры хладагента (пунктирная линия – расчетные данные); 2) до температурного уровня -30^0C для охлаждения хладагента используется одноступенчатая парокомпрессионная холодильная установка, а для обеспечения более низких температур нужно использовать уже двухступенчатую парокомпрессионную холодильную установку. Общая тенденция повышения мощности излучения и увеличения эффективного КПД остается в диапазоне от – 65 ^{o}C до – 30 ^{o}C, но следует отметить, что двухступенчатые холодильные машины стоят в несколько раз дороже, и их использование не всегда будет экономически оправдано. Следовательно, скорее всего наиболее оптимальный режим работы лазера по энергетическим затратам и мощности излучения лазера находится в температурном режиме от – 30 ^{o}C до – 10 ^{o}C.

4.2. Выбор мощности системы охлаждения на основе модулей Пельтье

Эффективность использования модулей Пельтье зависит от выбора подходящей модели и установки соответствующих режимов ее эксплуатации. Необходимо отметить, что неоптимальные мощность и режим работы системы охлаждения могут даже привести к выходу из строя, охлаждаемых компонентов. Оптимальный же выбор представляет собой сравнительно непростую задачу.

Одну из методик расчетов иллюстрируют графики на рис. 4.1, где приведены термоэлектрические характеристики одного из вариантов серийно выпускаемых термоэлектрических модулей. Здесь T_h(K) - температура горячей стороны модуля Пельтье, К; I_{max}(A) - максимально допустимый ток, А; dT_{max}(K) - максимальная разность температур между горячей и холодной сторонами модуля Пельтье, ([dT_{max}(K)] = 1 К; dT_{max}(K) - измеряется без нагрузки, в вакууме); U_{max}(V) - максимально допустимое напряжение, В; Q_{cmax}(W) - максимальная мощность хладообразования, Вт; R_{dTm} (OHM) - сопротивление модуля по переменному току, Ом.

Отметим, что значения указанных параметров модуля Пельтье зависят от температуры его горячей стороны. Таким образом, они несколько отличаются от значений в каталогах, где характеристики модулей приводятся для температуры 300 К (27 °С).

Методика расчетов по графикам характеристик состоит в следующем:

1. Задается температура горячей стороны модуля T_h, которая определяется способом отвода тепла от этой стороны модуля (жидкостный или воздушный). По графику $U(I)$ для выбранного напряжения U определяют силу тока I, протекающего через модуль Пельтье, при этом значение I должно лежать в диапазоне восходящей кривой $dT(I)$;

2. Для значения I по кривым, определяющим зависимость dT от тепловой мощности Q_C (в левом нижнем углу рис. 4.1) выбирается соответствующая характеристика;

3. По известным значениям температур T_h и dT определяется температура холодной стороны модуля Пельтье T_c:

$$dT = T_h - T_c,$$

где T_c - температура холодной стороны модуля, T_h - температура горячей стороны, dT - разность температур.

Из графиков зависимости dT от Q_c видно, что с увеличением тепловой мощности охлаждаемого элемента снижается разница температур между горячей и холодной сторонами модуля Пельтье. При этом чем выше сила протекающего через модуль тока, определяемая приложенным напряжением U, тем выше разность dT при фиксированной тепловой мощности Q_c.

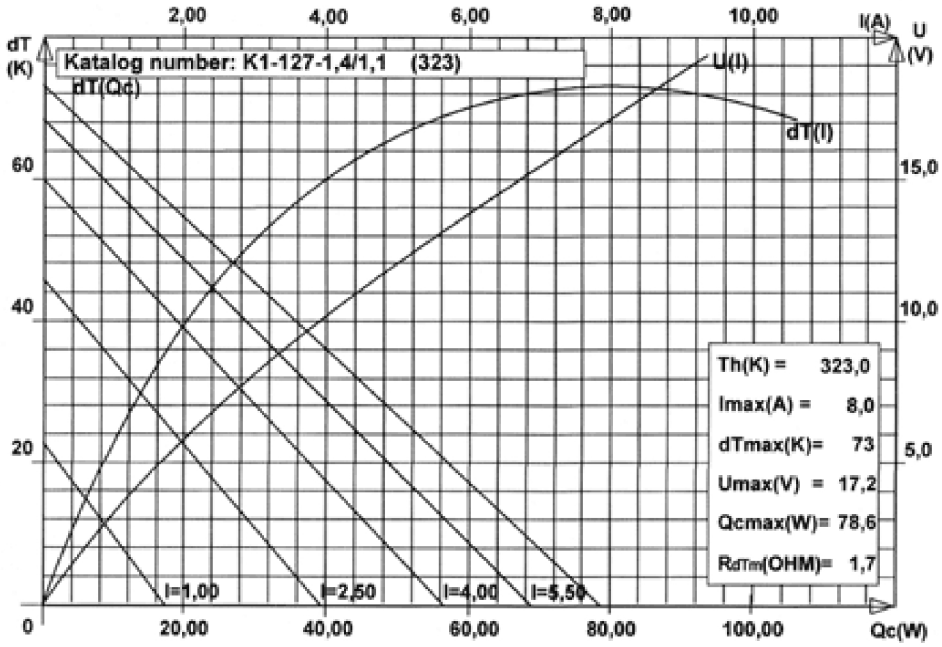


Рис. 4.1. Термоэлектрические характеристики полупроводникового модуля Пельтье

Приведем пример расчета, исходя из следующих начальных условий: подаваемое напряжение – 12 В; мощность охлаждаемого элемента - 20, 40 и 60 Вт; температура горячей стороны модуля Пельтье (основания охлаждающего модуль Пельтье радиатора) – 50 °С.

1. Для напряжения 12 В сила тока составляет 5 А;
2. Для силы тока в 5А и тепловой мощности охлаждаемого элемента 20 Вт разница температур dT составит примерно 45 К, для 40 Вт - 25 К, для 60 Вт - 4 К;

3. По определенным значениям dT и температуре горячей стороны модуля Пельтье, которая в данном примере составляет 323 К (50° С), можно вычислить температуру T_c для каждого значения Q_c. Для тепловой мощности охлаждаемого элемента, равной 20 Вт, температура холодной стороны модуля Пельтье составит 278 К (5 °С), для 40 Вт - 298 К (25 °С), для 60 Вт - 319 К (46 °С).

Очевидно, что при использовании более мощного модуля Пельтье можно достичь большей разности температур горячей и холодной сторон. Например, модуль с Q_c = 131 Вт (I_{max} = 8,5 А, U_{max} = 28,8 В), обеспечивает разность температур в 35…40^0 С для объектов с мощностью теплообразования 60 Вт.

Выбирая подходящий по мощности хладообразования модуль, нельзя забывать и о его собственной теплотворной способности. Действительно, для рассмотренного модуля, эксплуатируемого в описанном выше режиме (U = 12 В, I = 5 А), эта мощность составляет 60 Вт. В итоге тепловой поток, порождаемый охлаждаемым элементом и модулем Пельтье, должен рассеиваться в окружающей среде.

Средства охлаждения, представленные, как правило, радиатором и вентилятором, должны не только рассеивать довольно мощный тепловой поток, но и обеспечивать низкий уровень температуры горячей стороны модуля Пельтье. Связано это с тем, что модуль обеспечивает разность температур горячей и холодной своих сторон, поэтому чем ниже будет температура горячей его стороны (за счет охлаждающих средств), тем ниже окажется и температура холодной стороны, а следовательно, и прилегающей поверхности охлаждаемого объекта. Если традиционные устройства поддержания тепловых режимов не обладают необходимыми параметрами, решением может стать использование средств водяного охлаждения.

Кстати, следует обратить внимание, что, выбирая подходящий по мощности хладообразования модуль Пельтье, необходимо задействовать всю поверхность горячей и холодной сторон. В противном случае части модуля, не соприкасающиеся с поверхностью защищаемого объекта, например, кристал-

ла активного элемента, будут только впустую расходовать электроэнергию и выделять тепло.

Если же площадь, например, холодной стороны модуля, сделанной из керамики, превышает площадь контакта с охлаждаемым объектом, то следует применять промежуточные теплопроводящие пластины достаточных размеров и толщины. Промежуточная пластина должна быть сделана из материала с хорошей теплопроводностью, например из меди.

4.3. Выбор нагнетательного элемента

При течении хладагента всегда возникают сопротивления, препятствующие движению. Поэтому давление в канале тракта охлаждения прибора в направлении движения убывает. Полный перепад давления Δp по данному тракту при изотермическом движении равен:

$$\Delta p = \sum_{1}^{i} \Delta p_{T,i} + \sum_{1}^{k} \Delta p_{M,k}, \qquad (4.2)$$

где $\Delta p_{т,i}$ — гидравлическое сопротивление трения на i-м участке тракта, обусловленное вязкостью хладагента; $\Delta p_{м,k}$ — местные сопротивления, обусловленные вихреобразованием в местах изменения сечения канала и преодолением отдельных препятствий, например при входе, выходе, сужении, расширении, повороте и т. д.

В практических расчетах сопротивление трения в шлангах и в каналах вычисляется по формуле Дарси [3]:

$$\Delta p_T = \zeta_T \cdot \frac{l}{d_Э} \cdot \frac{\rho_Ж \cdot \vartheta^2}{2}, \qquad (4.3)$$

где ζ_T — коэффициент сопротивления трения, безразмерная величина, $d_э$ – эффективный диаметр, $\rho_ж$ – плотность хладагента, ϑ - скорость потока хладагента.

При ламинарном изотермическом движении хладагента и гладких трубах и каналах коэффициент сопротивления является функцией критерия Рейнольдса и формы поперечного сечения тракта

$$\zeta_T = \frac{K}{\mathrm{Re}}, \tag{4.4}$$

где коэффициент K определяется конфигурацией проходного сечения, например, для круга, квадрата и кольца соответственно равен 57, 64, 96 [2].

При турбулентном движении для значения $\mathrm{Re}=3\cdot10^3 \div 10^6$ коэффициент сопротивления рассчитывают по соотношению:

$$\zeta_T = \frac{0,3164}{\mathrm{Re}_f^{0.25}}, \tag{4.5}$$

Местные сопротивления определяют по формуле:

$$\Delta p_M = j \cdot \frac{\rho_Ж \cdot \vartheta^2}{2}, \tag{4.6}$$

где j — коэффициент местного сопротивления. В справочной литературе [2] подробно изложены способы нахождения коэффициента j для большого числа случаев местного сопротивления течению жидкости (газа); этими сведениями следует прямо воспользоваться при расчете падений напора в элементах систем охлаждения лазера.

Определение величины гидравлического сопротивления элементов системы охлаждения и всего тракта в зависимости от расхода хладагента и конструктивных особенностей каналов проводится с целью построения связи:

$$\Delta p = f(Q), \tag{4.7}$$

В установившемся режиме перепад давления в системе Δp должен компенсироваться напором нагнетательного элемента (вентилятора, насоса или компрессора) P, т. е. $\Delta p \leq P$. Основной задачей гидродинамического расчета системы охлаждения лазера является выбор такого нагнетательного элемента, который бы обеспечивал выполнение соотношения $\Delta p = f(Q)$ при определенной, в результате расчетов тепловых режимов элементов лазера, величине расхода хладагента Q.

Напорные характеристики нагнетательных элементов обычно представляют зависимостью $P = \varphi\ (Q)$. Каждый нагнетательный элемент имеет свою

напорную характеристику, графически представляемую аналогично изображенной для примера кривой на рис. 4.2.

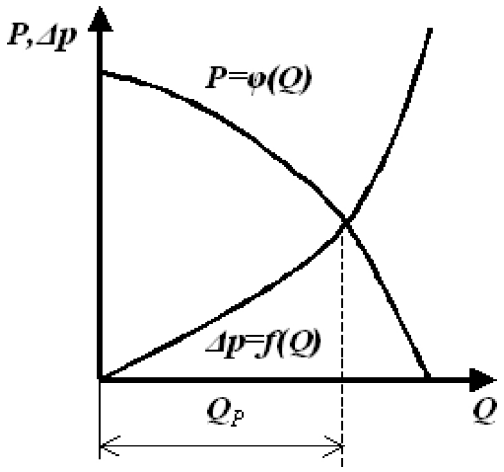


Рис. 4.2. Графическое определение рабочего расхода охлаждающей жидкости газа в трактах систем охлаждения лазеров

Определение взаимного соответствия напора нагнетательного элемента при заданном расходе Q_H и перепаде давления в тракте при том же расходе проводят графическим путем, т. е. путем совмещения на графике характеристик $\Delta p = f(Q)$ и $P = \varphi(Q)$. Точки пересечения характеристик определяют реальный перепад напора и расход Q_p (рабочий расход) в системе охлаждения с данным нагнетательным элементом. В идеальном случае $Q_P = Q_H$. Однако редко удается подобрать такой нагнетательный элемент, у которого напорная характеристика пересеклась бы с расчетной в точке Q_H. Учитывая погрешности определения зависимостей $\Delta p = f(Q)$ и $P = \varphi(Q)$, оптимальным считается вариант, при котором рабочий расход больше номинального примерно на 10-15%.

Если при проектировании системы охлаждения не удается подобрать по результатам расчета подходящий серийный нагнетательный элемент, то необходимо уменьшить гидравлическое сопротивление системы путем увеличения диаметров канала, обращая внимание на каналы наименьшего диаметра, снижения скорости течения охлаждающей жидкости, например введением системы параллельных ветвей, или заменой продольного обтекания элементов осветительной камеры лазера на поперечное, устранения резких изменений се-

чения и крутых изгибов каналов. При невозможности использовать в схеме известные нагнетательные элементы отправным моментом при разработке нового насоса или вентилятора может являться построенная в результате гидродинамического расчета системы охлаждения лазера зависимость $\Delta p = f(Q)$.

При подборе оборудования необходимо учесть, что основные характеристики системы охлаждения при использовании растворов гликолей высокой концентрации будут существенно отличаться от рассчитанных при нормальной температуре и воде в качестве теплоносителя. Как правило, точные характеристики системы охлаждения с учетом концентрации гликоля и при различных температурах теплоносителя можно пересчитать с помощью программ подбора или таблиц, предоставляемых производителями парокомпрессионных холодильных машин. В качестве примера на рис. 4.3 и 4.4 показано, как изменяются основные показатели холодильной машины (холодопроизводительность, потребляемая мощность компрессора, расчетный расход теплоносителя) в зависимости от концентрации раствора этиленгликоля и пропиленгликоля при температуре теплоносителя +5/+10 °С.

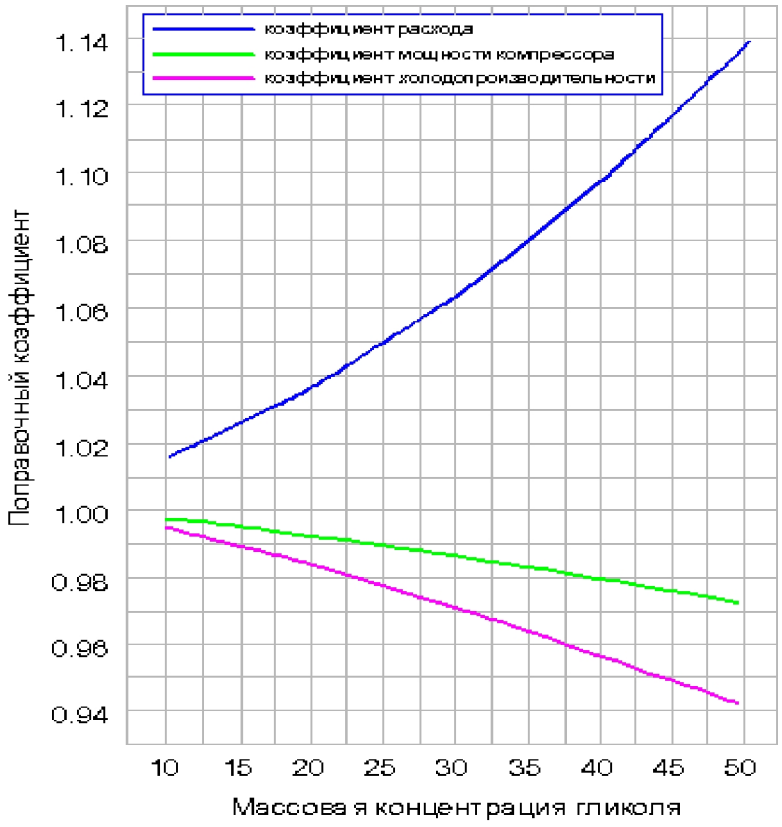


Рис. 4.3. Значения коэффициентов для этиленгликоля

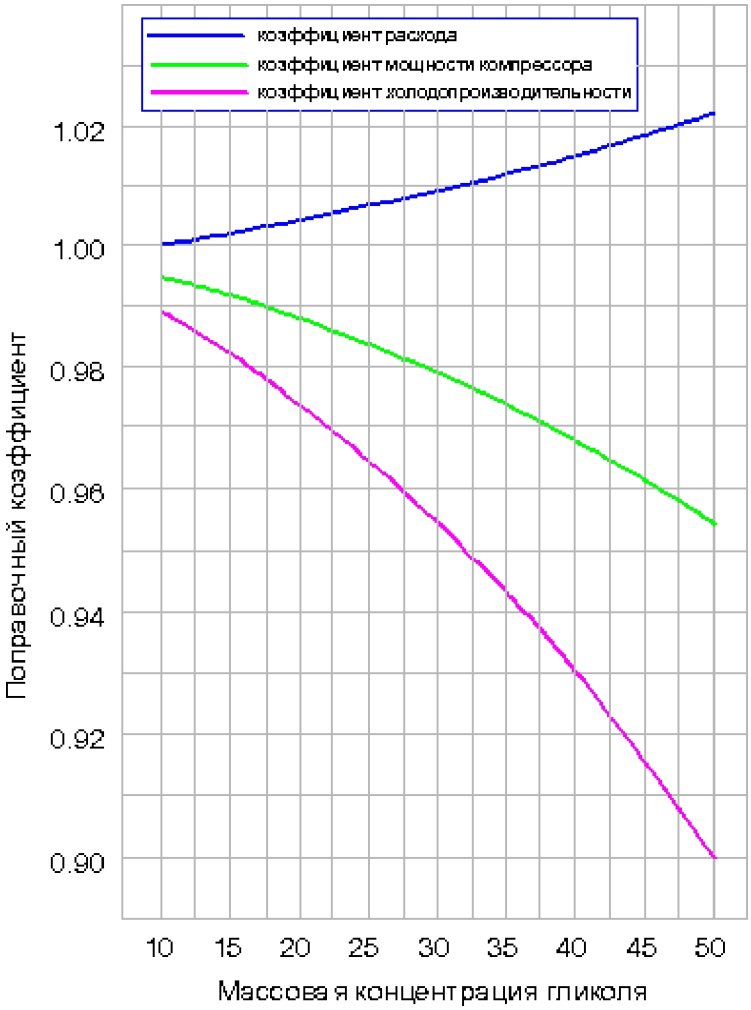


Рис. 4.4. Значения коэффициентов для пропиленгликоля

Так как этиленгликоль и пропиленгликоль обладают высокой вязкостью, как следствие, значительно возрастают гидравлические потери на трение в трубопроводах и на преодоление гидравлических сопротивлений. На рис. 4.5 и 4.6 приведены поправочные коэффициенты падения давления в зависимости от температуры и концентрации раствора.

Выбор насосного оборудования также требует тщательного подхода не только с точки зрения конструктивных особенностей и вариантов размещения в схеме системе, но и в расчете характеристик. На рис. 4.7 показано, как изменяются характеристики реального центробежного насоса при перекачивании жидкости с вязкостью большей чем у чистой воды:

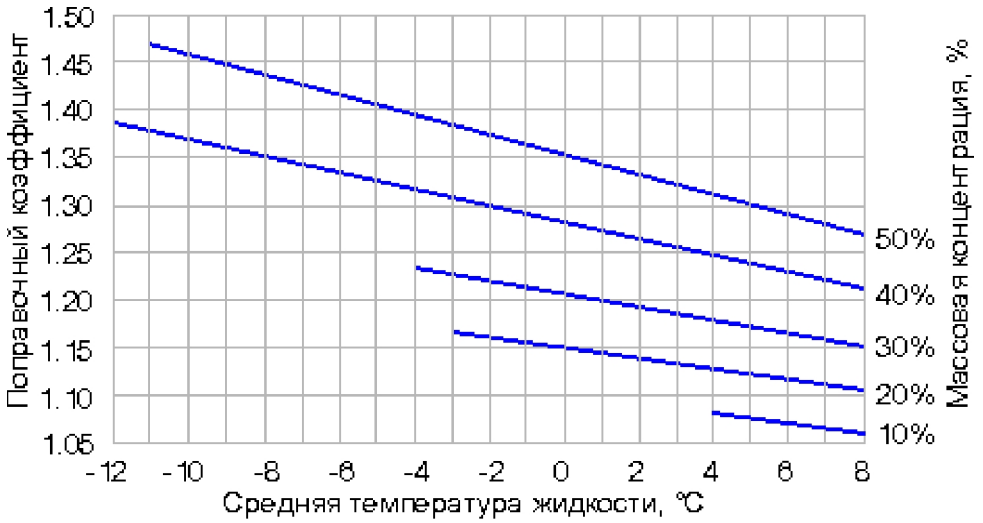


Рис. 4.5. Поправочные коэффициенты падения давления для раствора этиленгликоля

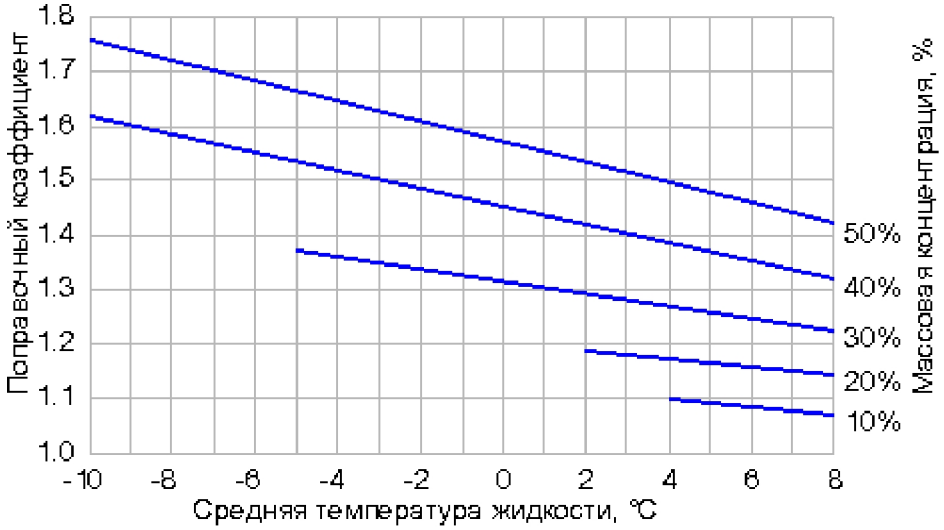


Рис. 4.6. Поправочные коэффициенты падения давления для раствора пропиленгликоля

Пример подбора насоса для прокачки теплоносителя

В качестве примера, рассмотрим подбор насоса при использовании в системе в качестве теплоносителя раствора этиленгликоля. Исходные данные:

- требуемый расход теплоносителя в системе $G = 50\ м^3/час$,
- требуемый напор на сеть $h = 18{,}5\ м$,
- температура жидкости $t = -15\ ^0C$,
- концентрация этиленгликоля = 40% масс.

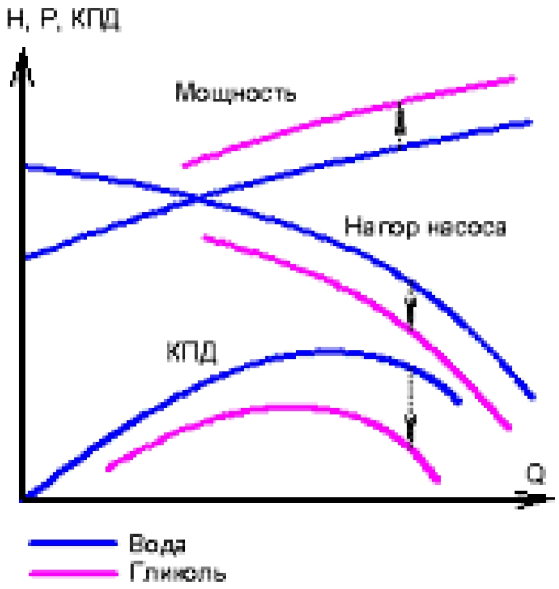


Рис. 4.7. Зависимость характеристик насосного оборудования от физических свойств теплоносителя

С помощью диаграммы состояния раствора этиленгликоля (рис. 4.9) по температуре и концентрации определяем динамическую вязкость и плотность раствора:

- динамическая вязкость $\mu = 12\ м \times Па \times с$,
- плотность $\rho = 1070\ кг/м^3$.

Находим кинематическую вязкость раствора ν: $\nu = \mu/\rho = 11{,}2\ мм^2/с$

Исходя из расчетных расхода и напора насоса и рассчитанной кинематической вязкости по номограмме пересчета характеристик центробежных насосов (рис. 4.8) определяем требуемый напор насоса по стандартным характеристикам, коэффициент напора равен 1,02, т.е. для обеспечения расхода 50 $м^3$/час и перепада давлений теплоносителя 18,5 м необходимо выбрать насос с напором по стандартной характеристике h = 18,87 м. Этому условию соответствует насос LME 80-125/133 фирмы Grundfos. По номограмме пересчета характеристик центробежных насосов уточняем поправочный коэффициент потребляемой мощности насоса, он равен ς=1,1, т.е. фактическая мощность равна:

$$P_{факт} = \varsigma \cdot \rho \cdot P_{ст}\ , \qquad (4.8)$$

где $P_{ст}$ – мощность насоса по стандартной характеристике. Для насоса LME 80-125/133 $P_{ст}$=*3,6 кВт*. $P_{факт}$ = *1,1 ·1,07 ·3,6 = 4,24 кВт*.

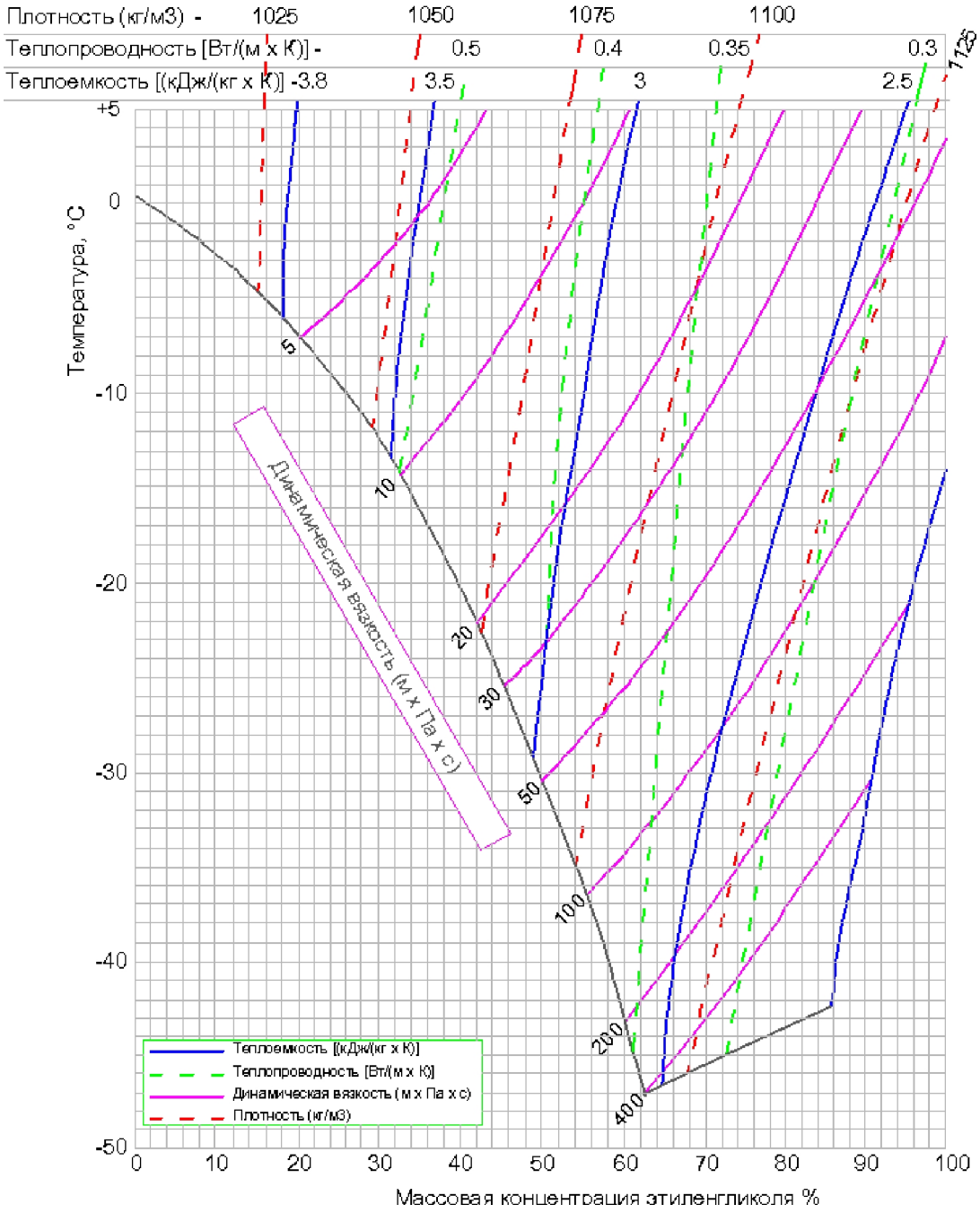


Рис. 4.8. Диаграмма состояния раствора этиленгликоля

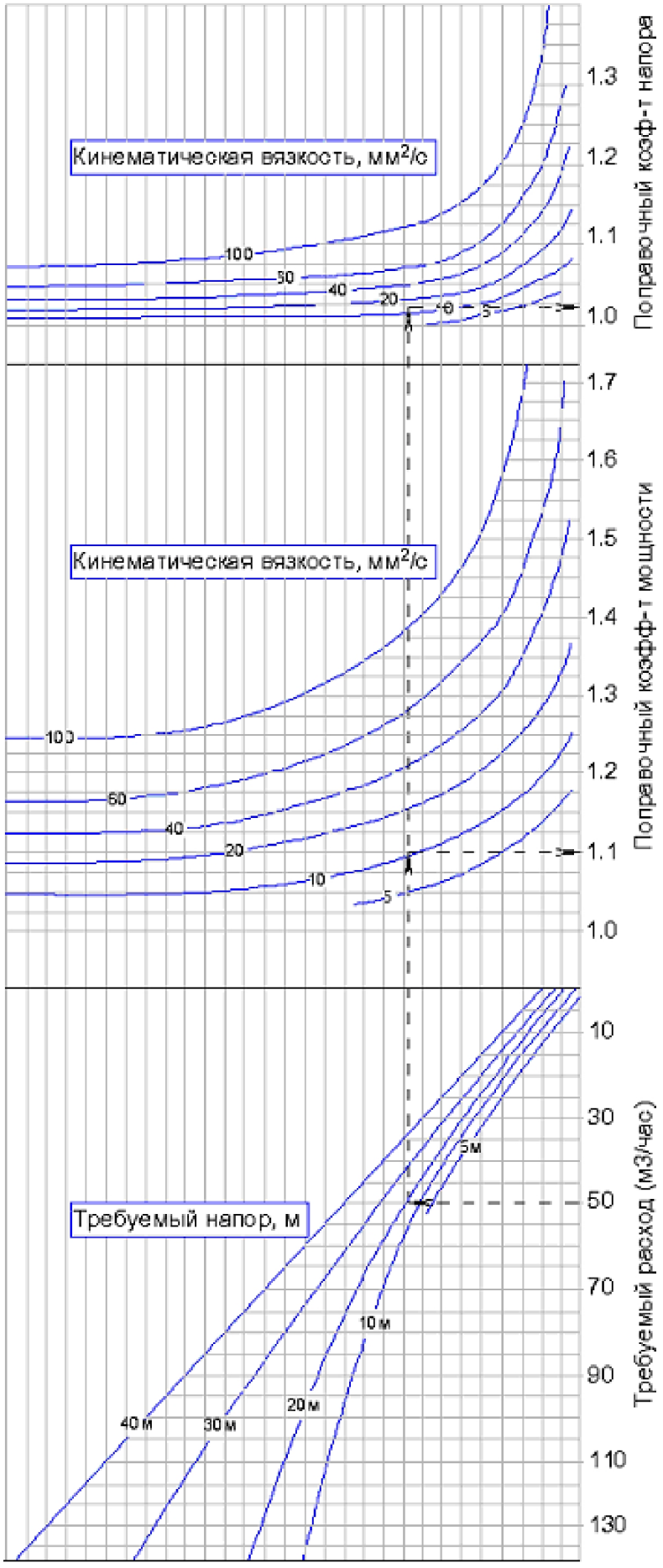


Рис. 4.9. Номограмма пересчета характеристик центробежных насосов

4.4. Алгоритм расчета системы охлаждения лазера

1. Необходимо определить количество тепла Q, которое необходимо отводить от лазера в одну секунду. Для простоты решения этой задачи в первом приближении, считаем, что оно равно мощности, подводимой к лазеру $Q=W$ (W – мощность, подводимая к лазеру).
2. Выбирается тип системы охлаждения: одноконтурный или двухконтурный.

Расчет одноконтурной системы охлаждения

1. Выбираем хладагент. Обычно в таких системах хладагентом является водопроводная вода.
2. Определяем необходимый расход воды по формуле:

$$G = \frac{Q}{c \cdot (t_{вых} - t_{вх})}, \tag{4.9}$$

где с – теплоемкость хладагента, $t_{вых}$ и $t_{вх}$ – температура хладагента на выходе и на входе в систему охлаждения. Разница между этими температурами около 5-10 ^{o}C.

3. Проверяется, может ли система водоснабжения на месте планируемого размещения работы лазера обеспечить необходимый расход воды, определенный в предыдущем пункте.
4. Если система не может обеспечить, требуемый расход , то возможно, необходимо для охлаждения использовать двухконтурную систему охлаждения с холодильной машиной.

Расчет двухконтурной системы охлаждения

1. Выбираем хладагент первого контура. Хладагентом может быть дистиллированная вода, тосол или антифриз (последние два используются при необходимости охлаждения лазера до отрицательных температур).
2. Определяем необходимый расход хладагента по формуле (4.9).
3. Выбирается нагнетательный элемент по рассчитанному расходу хладагента и с учетом гидравлических потерь в гидравлическом тракте. Полезная мощность N_0 насоса (т. е. механическая энергия, которую насос

сообщает всей массе хладагента в секунду.) и мощность двигателя N определяются:

$$N_0 = \frac{\Delta p}{\rho} G; \qquad N = \frac{N_0}{\eta}, \tag{4.10}$$

где Δp – полный перепад давления в тракте, ρ – плотность хладагента, η – КПД насоса (у современных насосов около 0,75-0,8)

4. Подбирается холодильная машина, обеспечивающая необходимый уровень хладопроизводительности Q_X, равную:

$$Q_X = Q + N + Q_{изол}, \tag{4.11}$$

где $Q_{изол}$ - тепло утечки через изоляцию (приблизительно составляют величину около 0,05-0,07Q).

4.5. Пример расчета системы охлаждения лазера ЛГН-703

Ниже представлен расчет системы охлаждения излучатель отпаянного лазера ЛГН-703, который применяется в лазерных хирургических установках (ЛХУ) типа «Скальпель» и «Ромашка». Для него необходимо подобрать холодильную машину, обеспечивающую охлаждение хладагента первого контура до температуры – 15 °С.

Лазер газовый ЛГН-703 непрерывного действия имеет следующие паспортные данные:

- Падение напряжения на электродах активного элемента - $U=10кВ$.
- Ток разряда - $I=40мА$.
- Мощность лазерного излучения - $P=25Вт$.

Из этого следует, что мощность W, вкладываемая в активную среду лазера, равна:

$$W = U \cdot I = 10кВ \cdot 40мА = 400 \ \ Вт, \tag{4.12}$$

Это значит, что от лазера необходимо отводить $375Вт$. Для этого подбираем, холодильную машину, обеспечивающую требуемую хладопроизводительность на температурном уровне $t = -15\ ^oC$. Например, такие характери-

стики может обеспечить холодильная машина МХНК-500Р [12] со следующими рабочими характеристиками:

- Рабочие температуры: от – 10 до – 18 °С;
- Хладагент: R22 ($CHClF_2$) – хладагент семейства фреонов (фтохлорпроизводные простейших предельных углеводородов);
- Хладопроизводительность Q_x: до 500Вт.

Регулировка расхода хладагента холодильной установки позволяет варьировать ее хладопроизводительность и рабочую температуру охлаждения.

Определяем необходимый расход хладагента холодильной машины по формуле:

$$G_X = \frac{Q_x}{c \cdot \rho \cdot (t_{вых} - t_{вх})}, \qquad (4.13)$$

где c – теплоемкость хладагента (в нашем случае R22 и c = 1152 Дж/кг·К), ρ – плотность хладагента (в нашем случае R22 и ρ = 1258 кг/м^3) $t_{вых}$ и $t_{вх}$ – температура хладагента на выходе из и на входе в теплообменник-испаритель. Разница между этими температурами около 10 °С. Расчет дает значение около G_x= 0,028 л/с = 1,7 л/мин. Таким образом, необходимо настроить холодильную машину на расход хладагента около 1,7…2 л/мин.

Схема системы охлаждения лазера ЛГН-703, использующая холодильную установку МХНК-500Р, представлена на рис. 4.10.

Основной контур системы охлаждения осуществляет непосредственный отвод тепла от газоразрядной трубки лазера. Его работа осуществляется следующим образом: Насос подает хладагент из расширительного бачка к лазеру. После насоса хладагент охлаждается в теплообменнике – испарителе до требуемой температуры. Затем он подается через входной штуцер в контур охлаждения разрядной трубки, а через выходной штуцер он выходит из контура и попадает в расширительный бачок. Часть трубопроводной системы до насоса называется всасывающей, а за насосом – нагнетающей или напорной.

Для обеспечения заданной температуры охлаждения выбирается хладагент, позволяющий работать на отрицательных температурах, например,

ТОСОЛ-А40, имеющий следующие характеристики ρ = 1080 кг/м^3, v = 1,25·10^{-6} м^2/с и c = 3190 Дж/кг·К. Рассчитываем по формуле (4.2) расхода ТОСОЛа в основном контуре, принимая разность температур на входе и выходе, равной 5 °С. Расчет дает следующее значение G_T = 0,023 л/с = 1,4 л/мин.

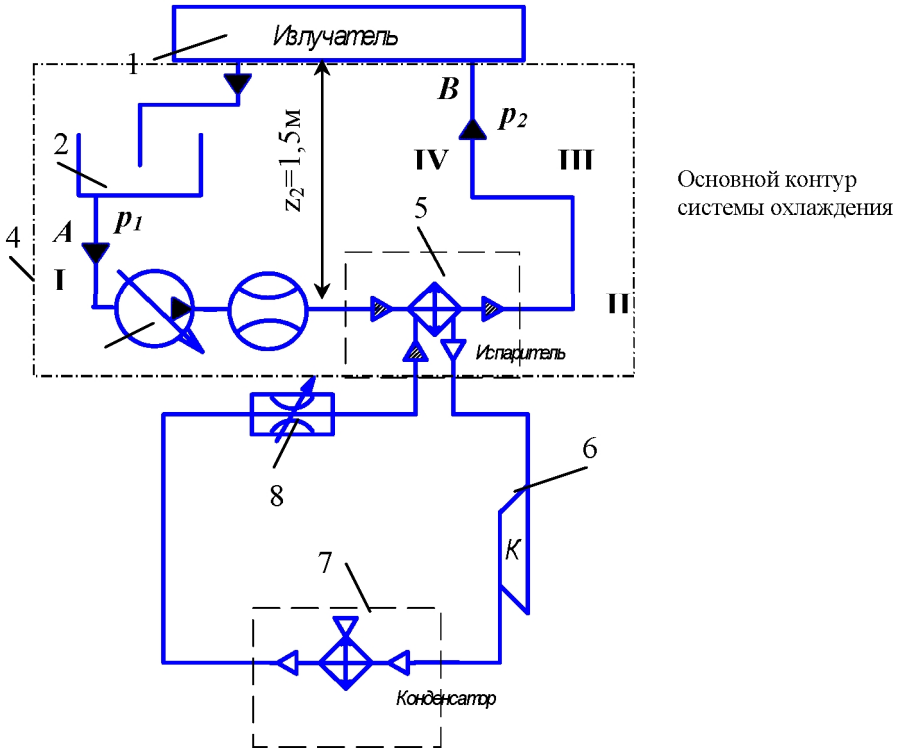


Рис.4.10. Схема системы охлаждения лазера ЛГН-703:
1 - излучатель, 2 - расширительный бачок, 3 - насос с регулируемой производительностью, 4 - расходомер, 5 - испаритель (здесь, в этом теплообменнике тепло отбирается от хладагента первого контура), 6 - компрессор, 7 - конденсатор (здесь, в этом теплообменнике тепло отбирается вентилятором от хладагента второго контура), 8 - дроссель

Необходимо подобрать насос, обеспечивающий данный расход ТОСОЛа, и рассчитать мощность привода к нему. Для этого следует определить полный перепад давления Δp жидкости по данному тракту, возникающий в результате действии всех местных сопротивлений в контуре. Предположим, что трубопровод технически гладкий, с внутренним диаметром – d = 8·10^{-3} м и полной длиной около l = 4 м. Давление ТОСОЛа на входе в насос – p_1 = 1,2·10^5 Па.

Методика подбора насоса состоит из этапов представленных ниже.

1. Определим режим течения в трубопроводе:

$$\mathrm{Re} = \frac{u \cdot d}{\nu}, \tag{4.14}$$

где u – скорость жидкости течения в контуре, равная:

$$u = \frac{4 \cdot G_T}{\pi \cdot d^2} = 0,46 \qquad \text{м/с} . \tag{4.15}$$

Расчет по формуле (4.3) дает следующее значение Re = $2,95 \cdot 10^3$ >2300 – режим течения турбулентный.

2. Определим полный перепад давления Δp по данному тракту, складывающийся из суммы всех гидравлических сопротивлений трения и всех местных сопротивлений:

$$\Delta p = \sum_1^i \Delta p_{T,i} + \sum_1^k \Delta p_{M,k}, \tag{4.16}$$

где $\Delta p_{т,i}$ — гидравлическое сопротивление трения на i-м участке тракта, обусловленное вязкостью хладоагента; $\Delta p_{м,k}$ — местные сопротивления, обусловленные вихреобразованием в местах изменения сечения канала и преодолением отдельных препятствий, например при входе, выходе, сужении, расширении, повороте и т. д.

Перечислим все местные сопротивления: I, II, III, IV - отводы R/d=2 δ=90°, расходомер (4), теплообменник (5). Тогда формула для полного перепада давления будет выглядеть следующим образом [13]:

$$\Delta p = (\zeta_{TP} \cdot \frac{l}{d} + \zeta_I + \zeta_{II} + \zeta_{III} + \zeta_{IV} + \zeta_{TEП} + \zeta_P) \frac{\rho u^2}{2}, \tag{4.17}$$

где ζ_{TP} – коэффициент сопротивления трения, который определяется по формуле:

$$\zeta_{TP} = \frac{0,3164}{\mathrm{Re}^{0.25}}; \tag{4.18}$$

расчет дает значение ζ_{TP}=*0,043;* ζ_I, ζ_{II}, ζ_{III}, ζ_{IV} – коэффициенты сопротивления отвода, взятые из справочных данных, и равные соответственно $\zeta_I = \zeta_{II} = \zeta_{III} = \zeta_{IV}$ = 0,13; $\zeta_{TEП}$ = *35* – коэффициент местного сопротивления теплообменника, ζ_P =*7* - коэффициент местного сопротивления расходомера. Подставляя все значения в (4.6), получаем:

$$\Delta p = (0.043 \cdot \frac{4}{8 \cdot 10^{-3}} + 4 \cdot 0.13 + 7 + 35) \frac{1080 \cdot (0.46)^2}{2} = 37160 \quad Па$$

Полезная мощность, которую насос сообщает всей массе ТОСОЛа, равна:

$$N_0 = \Delta p \cdot G_T = 8,5 \quad Вт \tag{4.19}$$

Мощность, затрачиваемая двигателем на привод насоса N, определяется:

$$N = \frac{N_0}{\eta}, \tag{4.20}$$

где η – КПД насоса (у современных насосов около 0,7-0,8). Расчет дает значение N = 12 Вт. По рис. 4.9 определятся коэффициент напора, который равен 1,15, и поправочный коэффициент потребляемой мощности насоса, он равен ς=1,23, т.е. фактическая мощность равна по формуле (4.8)

$$P_{факт} = 1,23 \cdot 1,15 \cdot 12 = 17 \; Вт.$$

Таким образом, для системы охлаждения лазера на заданном температурном уровне должен быть выбран насос мощностью 17 Вт.

4.6. Элементы систем охлаждения

Приборы визуального контроля. Приборы визуального контроля применяются обычно при наладке системы охлаждения, а также при измерении генерационных характеристик лазера и исследовании их зависимости от параметров системы охлаждения. К приборам визуального контроля относятся приборы для измерения расхода, давления и температуры хладоагента, а также датчики уровня жидкости в резервуарах.

Контроль давления в тракте охлаждения осуществляют пружинными манометрами или манометрами мембранного типа.

Расход хладоагента можно измерять расходомерами поплавкового типа (РС-3, РС-5, РС-7) и скоростными расходомерами.

Контроль за уровнем жидкости в резервуаре ведется специальными щупами или выводными прозрачными трубками, предусмотренными при конструировании системы охлаждения.

Гидрореле. Гидрореле — один из наиболее важных защитных приборов в жидкостных системах охлаждения, так как прекращение подачи жидкости или снижение давления в трактах может привести к срыву генерации и выходу из строя охлаждаемых элементов ОКГ. Гидрореле выполняет две функции: сигнализации и защиты. Действие гидрореле основано на том, что внутри его рабочего объема при протекании жидкости возникает повышенное давление. Оно падает, когда уменьшается скорость жидкости или прекращается ее поступление в тракт охлаждения. Конструкция гидрореле (один из многочисленных вариантов) изображена на рис. 4.11. Гидрореле включается в тракт охлаждения своим штуцером 1. Жидкость, циркулирующая в системе, заполняет рабочий объем А и вызывает в нем рост давления до уровня, равного давлению в тракте охлаждения в месте установки

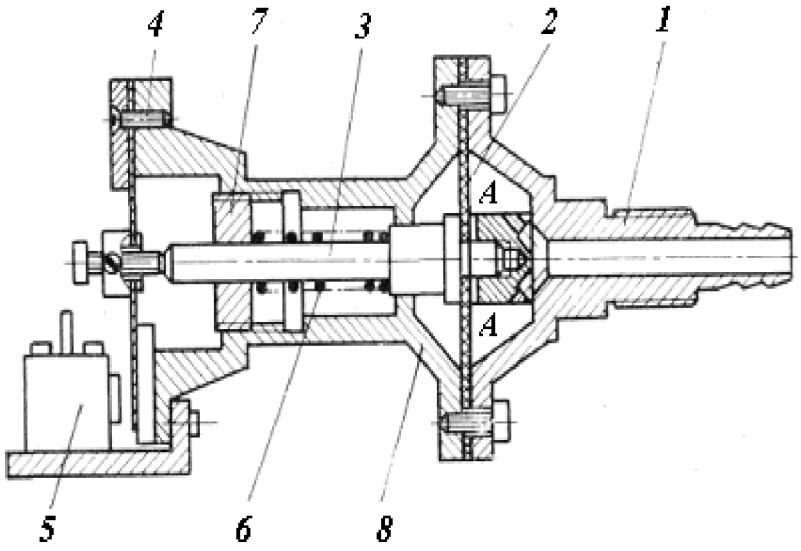


Рис. 4.11. Гидрореле:
1 - штуцер; 2 - мембрана; 3 - шток; 4 - пленка; 5 - микровыключатель; 6 - пружина; 7 - гайка; 8 - корпус

штуцера. Давление в рабочей камере вызовет деформацию мембраны и перемещение жестко связанного с мембраной штока. Смещение штока передается планке и кнопке микровыключателя, включенного в электрическую схему управления поджигом ламп накачки.

При снижении давления ниже заданного уровня (поломка насоса, перегиб или разрыв шлангов и т. п.) под действием возвратной пружины мембрана, шток, планка возвращаются в исходное состояние, а микровыключатель разрывает цепь поджига. Гидрореле можно регулировать на определенное давление путем поджатия возвратной пружины 6 и гайкой 7.

Предохранительные клапаны. В жидкостных системах охлаждения, рассчитанных на работу при значительных напорах, при резком изменении режима течения хладагента (включение нагнетательных элементов, переключение ветвей тракта охлаждения) происходит увеличение давления. Это явление называется гидравлическим ударом. Увеличение давления при гидравлическом ударе может нарушить герметичность тракта охлаждения, привести к подтеканию хладагента или даже к разрыву трубопровода. Для надежной работы системы охлаждения необходимо принять следующие меры, уменьшающие действие гидравлического удара:

1. Тракт охлаждения должен быть сконструирован таким образом, чтобы по всей его длине сохранялась одинаковая площадь проходного сечения; при этом исключаются местные резкие изменения скорости течения хладагента.

2. Краны, вентили и задвижки должны перекрывать трубопроводы достаточно медленно. Время закрытия t в секундах может быть подсчитано по формуле: [14]

$$t \geq \frac{2\rho_{ж} \upsilon \cdot l}{P'}, \qquad (4.21)$$

где $\rho_{Ж}$ — плотность жидкости, кг/м^3; l — длина трубопровода, м; P' — допускаемое повышение давления, Па.

Необходимо подчеркнуть, что время закрытия прямо пропорционально длине трубопровода, т. е. чем длиннее трубопровод, тем длительнее должно быть перекрытие кранов и задвижек.

3. В схему системы охлаждения вводят предохранительные редукционные клапаны, которые, открываясь при определенном давлении, не допускают его резкого повышения. Кроме предохранительных клапанов для уменьшения давления применяют диафрагменные и поршневые гасители гидравлического удара, а также воздушные колпаки [3].

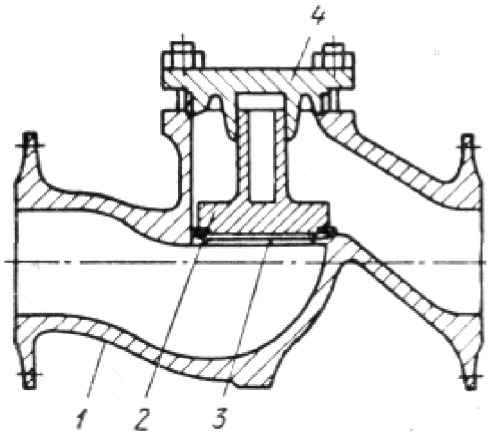


Рис. 4.12. Обратный клапан:
1 - корпус; 2 - клапан; 3 - кольцо; 4 - крышка

4. Для предотвращения развития ударной волны в потоке на напорном трубопроводе устанавливают обратные клапаны. Изображенный на рис. 4.12 обратный клапан предназначен для установки на горизонтальных трубопроводах [3]. При нормальной работе системы клапан приподнят и жидкость свободно проходит через него. При возникновении обратного давления клапан закрывается и жидкость в систему не поступает.

Насосы систем охлаждения. Для создания в жидкостной системе охлаждения лазера принудительной циркуляции жидкости применяют центробежные насосы. Принципиально любой из них может быть рассмотрен как агрегат, состоящий из трёх частей (рис. 4.13): полости нагнетания (спиральный корпус), присоединительного фланца и выпуск-

ной полости (патрубок). Основными деталями являются рабочее колесо (крыльчатка) 4 и спиральный корпус 1. Из впускного патрубка этих насосов охлаждающая жидкость поступает в рабочее колесо. При этом в каналах рабочего колеса отмечается замедление течения. Из рабочего колеса жидкость., получившая приращение энергии, поступает в отводящее устройство, предназначенное для отвода и направления жидкости с минимальными потерями и преобразования кинетической энергии в энергию давления.

В жидкостных насосах автомобильных двигателей отводящие устройства выполняют также в виде спирального корпуса из которого жидкость поступает в охлаждающие полости двигателя. В двухрядных двигателях иногда предусмотрены два отвода из спирального корпуса для получения более равномерного распределения потока. Характеристиками насоса: являются подача $G_{ж}$ (кг/с, м^3/с), напор P (Н/м^2), мощность, потребляемая насосом N_H (Вт), КПД насоса. Все характеристики насоса соответствуют определённой частоте вращения рабочего колеса.

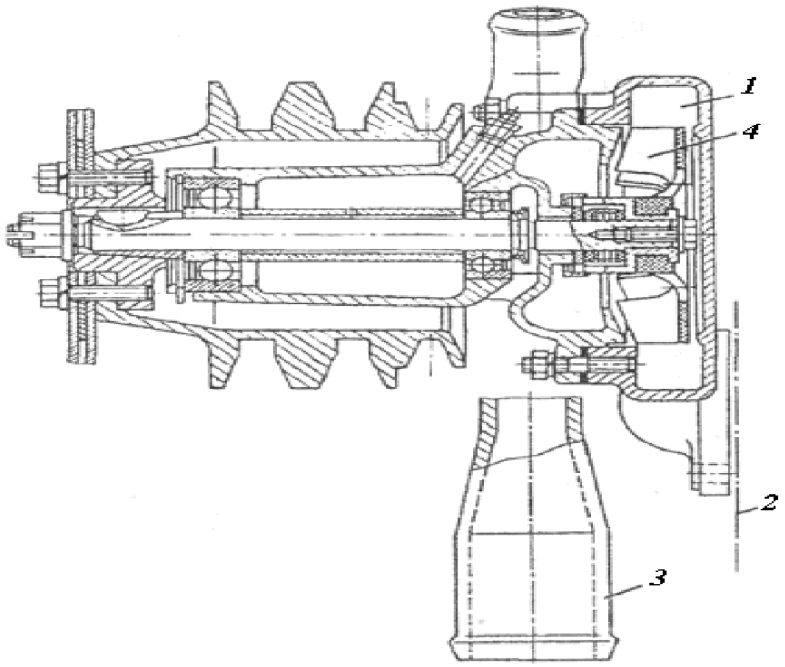


Рис. 4.13. Жидкостный насос системы охлаждения:
1 - полость нагнетания; 2 - место расположения переднего торца блока; 3 - выпускной патрубок; 4 – крыльчатка

КПД насоса при объемной подаче определяется по формуле:

$$\eta_H = \frac{\rho \cdot G_Ж \cdot P}{1000 N_H}, \qquad (4.22)$$

где ρ – плотность прокачиваемой жидкости.

Обычно характеристики жидкостных насосов представляют в виде универсальных характеристик (рис. 4.14), которые показывают изменение напора и мощности, потребляемой насосом, в зависимости от подачи при различной частоте вращения рабочего колеса, а также линии равного КПД [15].

В процессе экспериментального определения характеристик насоса на специальном оборудовании его рабочее колесо соединяют с приводом, позволяющим изменить частоту вращения и измерить подводимую к насосу мощность. Изменение подачи насоса при постоянной частоте вращения осуществляется при изменении гидравлического сопротивления замкнутой системы, в которую включен насос, путём дросселирования потока в нагнетающей магистрали.

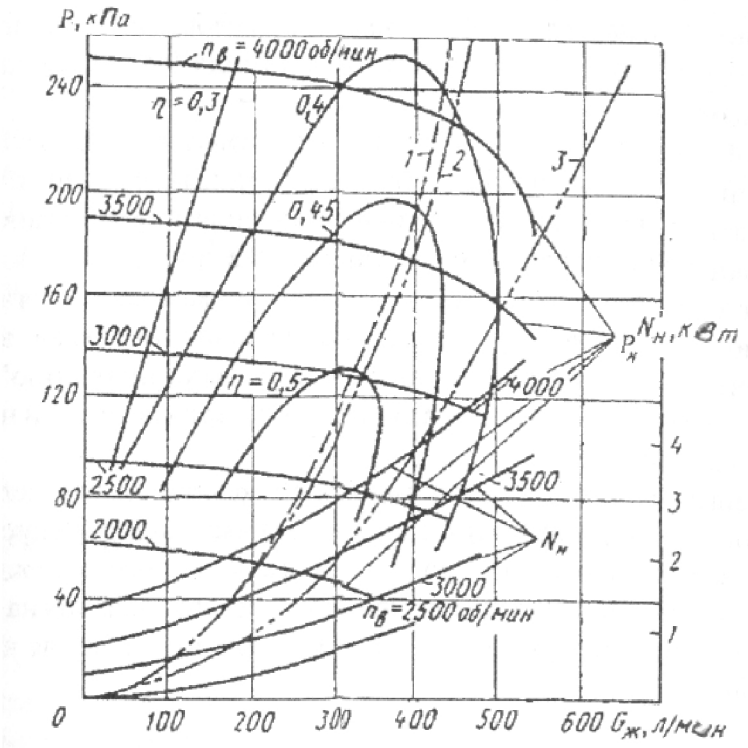


Рис. 4.14. Универсальная характеристика жидкостного насоса: 1-3 - сопротивления гидравлического контура системы охлаждения соответственно расчётное, экспериментальное и суммарное с перепускным каналом

Исследуемые параметры насоса определяют путём изменения частоты вращения рабочего колеса, подведённой мощности, подачи насоса, разности давлений на выходе и входе в насос. Обычно характеристики насоса устанавливаются при работе на воде; причём температура воды и давление в баке стенда поддерживаются постоянными.

Одной из особенностей работы жидкостных насосов является образование паровоздушных пузырьков на линии всасывания насоса, когда статическое давление меньше давления парообразования. Образование паровоздушных пузырьков в лопаточном канале изменяет характер течения жидкости в нём и оказывает влияние на напорную характеристику насоса. Перемещение пузырьков в зону повышенного давления, приводит к его "захлопыванию", сопровождающемуся шумом, и разрушению материала деталей насоса (явление кавитации).

Давление, при котором возникает явление кавитации, определяется экспериментально и является одной из важных эксплуатационных характеристик насоса. При работе насоса в системе охлаждения необходимо обеспечить поддержание статического давления на входе в насос больше экспериментально определённого давления начала кавитации.

В системе охлаждения лазера могут использоваться не только специализированные насосы, но и серийно выпускаемые прокачные устройства, которые применяются в различных областях жизнедеятельности человека. Например, насосы, применяемые в системах охлаждения автомобильных двигателях. В качестве примера ниже рассмотрена конструкция жидкостного насоса (рис. 4.15) двигателя автомобиля ГАЗ-53-12. Он закреплен на переднем торце блока цилиндров. Корпус 3 насоса состоит из двух частей: одна часть отливается из чугуна и прикрепляется к другой, изготовленной из алюминиевого сплава вместе с крышкой блока распределительных зубчатых колес. Вал 2 и ступица 1 вентилятора вращаются на двух шарикоподшипниках 14, запрессованных

в корпус 3. От смещения шарикоподшипники удерживаются распорной втулкой и стопорными кольцами. Для удержания смазочного материала и защиты от грязи шарикоподшипники имеют уплотнение и дренажное отверстие 4.

На одном конце вала напрессована ступица 1 вентилятора и шкива привода насоса и генератора. От осевого смещения ступица удерживается корончатой гайкой, которая тщательно зашплинтована. На другом конце вала напрессована пластмассовая крыльчатка 6, имеющая стальную ступицу. Крыльчатка удерживается от смещения гайкой и болтом, ввернутым в торец вала. Вал 2 в корпусе уплотнен самоподжимным сальником, состоящим из графитизированной текстолитовой шайбы 12, резиновой манжеты 11, двух обойм 9 и 10 и пружины 8. Сальник вращается вместе с крыльчаткой и валом насоса. Пружина 8 через резиновую манжету прижимает шайбу 12 к шлифованной плос-

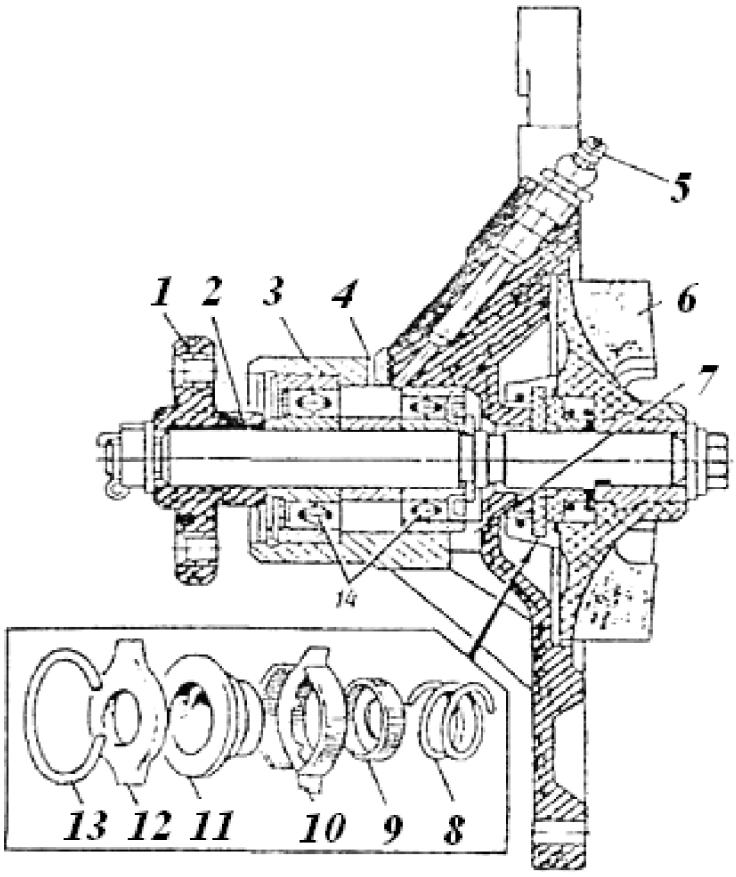


Рис. 4.15. Жидкостный насос системы охлаждения

кости корпуса 3, что предотвращает вытекание жидкости из насоса. Шарикоподшипники насоса смазывают пластичным смазочным материалом, который не вымывается жидкостью. Через масленку 5 смазочный материал подается шприцем в корпус насоса.

В табл. 4.1 - 4.3 представлены основные технические характеристики некоторых циркуляционных насосов для систем охлаждения. Некоторые насосы имеют встроенные приводы, а некоторые не имеют.

4.6.1. Насосы без встроенного привода

Примерами таких насосов являются прокачные устройства СО 2109-01 (рис. 4.16) и СО 2107-01 (рис. 4.17), используемые в автомобилях ВАЗ с карбюраторными двигателями. Являясь изделиями массового производства эти насосы относительно дешевы, а по своим техническим параметрам вполне пригодны для систем охлаждения лазеров. Насосы данного типа имеют следующие основные элементы конструкции: вал со специальным шарикороликовым радиальным подшипником; крыльчатка пластмассовая или алюминиевая; зубчатый шкив; герметичный аллюминиевый корпус; сальник с пружиной и уплотнительным кольцом; гальваническое покрытие корпуса обеспечивает надёжную защиту изделия от неблагоприятного воздействия агрессивных сред.

Рис. 4.16. Насос СО 2109-01

Рис. 4.17 Насос СО 2107-01

Таблица 4.1

Модель насоса системы охлаждения	2109-01	2107
Применяемость	ВАЗ-2108, -2109, -21099, -2110, -21102, -2111, -2112, -2113, -2114, -2115, -2122	ВАЗ-2101, -21011, -2102, -2103, -2104, -2105, -2106, -2107, -2121, -2130
При частоте вращения вала, об/мин	6000	
Подача охлаждающей жидкости, $м^3$/ ч	15	
Напор, м, не менее	9,9	
Потребляемая мощность, кВт, не более	0,88	
Габаритные размеры, мм	105x105x105	147,5x128x116
Масса, кг, не более	0,94	0,86

4.6.2. Насосы с встроенным приводом

Циркуляционные насосы UPS серия 100 фирмы Grundfos (рис. 4.18) являются насосами с электродвигателями, оснащенными мокрым ротором и защищенным статором, без сальниковых уплотнений, не требующими технического обслуживания и оборудованными противолежащими соединительными патрубками одинаковых номинальных внутренних диаметров.

Рис. 4.18. Циркуляционный насос UPS серия 100

В зависимости от типоразмера насосы могут быть как с резьбовыми трубными соединениями, так и с соединительными фланцами для подключения к трубопроводу.

Циркуляционные насосы Grundfos UPS серии 100 оснащены двух или четырёх полюсным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором. Электродвигатели могут иметь либо однофазную, либо трехфазную схему подключения к сети. Насосы типа UPS с электродвигателем, подключенным в однофазную сеть, имеют 3 ступени частоты вращения, а насосы, включенные в трехфазную сеть - 2 ступени. Насосы типа UP работают только с одной частотой вращения.

Рабочими жидкостями для данного насоса могут быть:

- Вода.
- Чистые, жидкие, не агрессивные и взрывобезопасные среды без минеральных масел, твердых или длинноволокнистых включений.
- Жидкости с вязкостью (кинематической вязкостью) до 10 мм·с.
- Этиленгликоль с концентрацией до 40%.

Таблица 4.2

Технические данные	
Подача	до 12 $м^3$ /ч
Напор	до 8 м
Температура рабочей среды	от -25 °C до +110 °C
Макс. эксплуатационное давление	10 бар
Уровень шума	не более 35 дБ(А)
Материалы	
Корпус насоса	Серый чугун GG 20, бронза
Рабочее колесо	Композит PES, армированный стекловолокном
Вал	Металлокерамика
Подшипниковая обойма	Нержавеющая сталь
Упорный подшипник	Керамика/графит
Радиальный подшипник	Керамика/керамика
Защитный экран статора	Нержавеющая сталь
Щелевое уплотнение	Нержавеющая сталь
Давление, выдерживаемое корпусом насосов	
Насос со штуцерным соединением	10 бар
Насос с фланцевым соединением PN 6/PN 10	10 бар

Таблица 4.3

Циркуляционные насосы GRUNDFOS UPS серии 100				
Тип	**Ду, мм**	**Ру, бар**	**Напряжение, В**	**Мощность кВТ**
UPS 25-30, 180	25	-	1x220	0.055
UPS 25-40, 180	25	-	1x220	0.08
UPS 25-60, 180	25	-	1x220	0.1
UPS 25-60, 180	25	-	3x380	0.14
UPS 25-80, 180	25	-	1x220	0.245
UPS 25-80, 180	25	-	3x380	0.27
UPS 32-40, 180	32	-	1x220	0.08
UPS 32-55, 180	32	-	1x221	0.14
UPS 32-60, 180	32	-	1x222	0.1
UPS 32-80, 180	32	-	1x223	0.245
UPS 32-80, 180	32	-	3x380	0.27

Другим насосом такого типа является прокачное устройство CO Star-RS 25/2-30/4 (рис. 4.19). Данный насос предназначен для прокачки воды и этиленгликолевых растворов.

Рис. 4.19. Циркуляционный насос CO Star-RS 25/2-30/4

Насос данного типа имеет следующие основные технические характеристики:

- Диапазон оборотов 1100-2200 1/мин
- трёх ступенчатое регулирование числа оборотов
- Допустимая температура -10°С до +110°С
- Рабочее давление max 10 bar
- Окружающая температура +40°С max
- Питание 230В, 50 Гц

4.6.3. Трубопроводная арматура

На рис. 4.20 - 4.22 представлен внешний вид следующих кранов: ВС-11, ПС7, ВС8-1, ВС8-1А и ВС8-3, которые позволяют осуществлять плавное перекрытие и регулирование потока хладагента.

Рис. 4.20. Кран ВС-11

Рис. 4.21. Кран ПС7

Рис. 4.22. Краны ВС8-1, ВС8-1А

Основные их характеристики данных устройств, представлены в таблицах 4.4 - 4.6, соответственно.

Таблица 4.4

Технические характеристики крана ВС-11

Условный проход (Ду), мм	11
Рабочее давление, кГс/см^2	до 0,5
Габаритные размеры, мм	100х24х63
Масса, кг	0,17

Таблица 4.5

Технические характеристики крана ПС7

Условный проход (Ду), мм	7
Рабочее давление, кГс/см^2	до 0,5
Габаритные размеры, мм	44х63х66
Масса, кг	0,11

Таблица 4.6

Технические характеристики кранов ВС8-1, ВС8-1А, ВС8-3

Тип крана	ВС8-1	ВС8-1А	ВС8-3
Условный проход (Ду), мм	8		
Рабочее давление, кГс/см^2	до 0,5		
Габаритные размеры, мм	65х44х17		52х46х17
Масса, кг	0,1		0,07

5. ТЕПЛООТВОД В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЛАЗЕРОВ. СОГЛАСОВАНИЕ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ И ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Лазер представляет собой систему, состоящую из излучателя и источника питания (ИП). Слово система происходит от греческого понятия «составленное» и объясняется в словарях как группа различных предметов, объединенных (естественно или искусственно) таким образом, что они образуют и функционируют, действуют или движутся согласованно и часто подчинены определенной форме управления [16]. Если отбросить пока еще экзотические газодинамические лазеры, лазеры с солнечной накачкой, химические лазеры, то в подавляющем большинстве случаев лазером в энергию когерентного излучения преобразуется электрическая энергия, которая в свою очередь черпается из стационарных электросетей, либо из бортовых электросетей мобильных устройств.

Активная среда накачивается непосредственно электрическим током в полупроводниковых, электроионизационных и электроразрядных лазерах. В лазерах на свободных электронах электронный пучок генерируется и формируется также в основном лишь за счет затрат электроэнергии. Более того, электронный пучок также находит применение для возбуждения активной среды в полупроводниковых и газовых лазерах. Несколько удлиняется путь преобразования электроэнергии в лазерах (твердотельных, на красителях и, реже, газовых) с оптической накачкой, но и в их лампах или светодиодах накачки основным расходуемым ресурсом является электроэнергия.

Под источником электропитания или короче ИП лазера следует понимать техническое устройство, обеспечивающее излучатель всеми необходи-

мыми токами и напряжениями и черпающее электроэнергию из электросети. Совместно с излучателем они составляют лазерное устройство.

Полный КПД преобразования электрической энергии в энергию лазерного излучения определяется тривиально, как отношение энергии излучения $E_и$ к электрической энергии $E_э$ потребляемой лазером от источника электроэнергии:

$$\eta_п = E_и / E_э \ . \qquad (5.1)$$

Прежде чем превратиться в энергию когерентного излучения электрическая энергия источника претерпевает целый ряд преобразований. Поэтому полный КПД преобразования электрической энергии в энергию когерентного излучения будет зависеть от КПД источника электропитания:

$$\eta_п = (E_и / E_{вых.ип}) \cdot (E_{вых.ип} / E_э) = \eta_и \ \eta_{ип} \ , \qquad (5.2)$$

где $E_{вых.ип}$ - энергия на выходе ИП; $\eta_и$ - КПД излучателя; $\eta_{ип}$ - КПД ИП. Если $\eta_и$ определяется активной средой, конструкцией и режимом работы излучателя, то $\eta_{ип}$ зависит, в основном, от современной базы электронной техники и грамотного согласования выходных параметров источника электропитания с вольт-амперными характеристиками активной среды, лампы накачки либо иного промежуточного агента (электронного пучка, разрядов различных видов и т.п.).

В настоящее время КПД источников электропитания постоянного тока составляет 0,65...0,8, причем 0,8 практически соответствует физическому пределу современной электронной базы. [17]. Для высоковольтных источников этот показатель несколько ниже 0,55...0,7 [18]. Для генераторов ВЧ накачки волноводных газоразрядных лазеров, на частотный диапазон 80...120 МГц в качестве ориентира может служить $\eta_и \sim 0,4$ [19].

Несмотря на высокий КПД ИП по сравнению с КПД большинства типов лазерных излучателей, потери энергии в нем имеются. Эти потери являются тепловыми, проявляются в повышенной температуре элементов ИП и должны быть рассеяны в окружающей среде через поверхности корпусов электронных

элементов ИП, радиаторов и плат, на которых смонтированы электронные элементы. Процессами теплоотвода во многом и определяются габариты ИП.

Основными удельными характеристиками ИП являются отношения его выходной мощности к объему γ_v отношение выходной мощности к массе γ_m. Позитивной тенденцией считается рост γ_v и γ_m . Рост объемной мощности соответствует снижению габаритов ИП, а рост массовой мощности соответствует уменьшению массы ИП. Для высоковольтных источников хорошими признаны следующие значения удельных характеристик: γ_v =100 Вт/дм^3 и γ_m =100 Вт/кг [18], хотя низковольтные имеют лучшие показатели. В высоковольтных источниках питания трудно достижимы предельные характеристики низковольтных, т.к. из-за возможных пробоев электронные компоненты высоковольтных ИП располагаются на больших расстояниях друг от друга и в качестве изолирующих материалов в них часто используется не воздух, а твердые или жидкие диэлектрики, у которых напряженность электрического поля пробоя на один-два порядка выше, чем у воздуха.

Повышению удельных характеристик мог бы способствовать переход от воздушного к жидкостному охлаждению силовых элементов ИП, если водяное охлаждение уже используется в самом лазерном излучателе, т.е. с точки зрения повышения удельных характеристик желательно проектирование лазера в целом. Такие конструктивные решения имеют место, например, в технологических лазерах швейцарской фирмы "Бистроник". Рост объемной мощности ИП твердотельных лазеров с оптической накачкой прогнозируется при использовании вместо ламп накачки лазерных диодов, т.к. для их возбуждения не требуется высоких напряжений и отпадают, таким образом, проблемы электрической прочности изоляции, которая в данном случае должна уже рассчитываться не на сотни и тысячи вольт, а на единицы – десятки вольт.

Для ИП, работающего в режиме установившегося температурного поля, тепловой расчет выполняется, исходя из уравнения теплового баланса:

$$P_{рас} = P_{под.с.} - P_{отв.из.} = \Phi_{тп} + \Phi_{кон} + \Phi_{изл} , \qquad (5.3)$$

где $P_{рас}$, $P_{под.с}$, $P_{отв.из.}$ – соответственно рассеиваемая, подводимая к ИП и от-

водимая в излучатель мощности; $\Phi_{тп}$, $\Phi_{кон}$, $\Phi_{изл}$ – тепловые потоки, отдаваемые через теплопроводность, конвекцию и излучение, соответственно.

Практически во всех известных серийных образцах ИП лазеров используется конвективный теплоотвод с естественной или принудительной конвекцией воздуха. Теплообмен излучением, в связи с переходом на полупроводниковую элементную базу с максимальной температурой корпусов 125 ^{o}C, не вносит существенного вклада в теплоотвод при наземных применениях лазерных приборов.

Конвективный теплообмен нашел преимущественное применение по следующим причинам: а) желанием или предписанием использовать стандартизованные или нормализованные узлы и детали, если это возможно (стандартные радиаторы под силовые полупроводниковые приборы рассчитаны на конвективный теплообмен); б) разработаны графоаналитические методики, позволяющие довольно просто и быстро рассчитывать тепловые характеристики электронных блоков при конвективном теплообмене; в) нарушение герметичности жидкостных теплообменников чревато возникновением аварийных ситуаций.

Перегрев компонентов ИП можно уменьшить путем увеличения теплоотдающей поверхности, т.е. установки компонента на радиатор (как синоним радиатора используется термин – охладитель). Для систем воздушного охлаждения широко используются следующие типы радиаторов: пластинчатые, ребристые, игольчато-штыревые и др. Малая плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность воздуха связаны с его большими объемными расходами и плохими характеристиками теплообмена. Благодаря существенно лучшим характеристикам теплопередачи, большой удельной теплоемкости, теплопроводности и плотности охлаждение жидкой средой значительно более эффективно по сравнению с воздушным охлаждением. Важным аргументом в пользу жидкостного охлаждения ИП лазеров служит факт его широкого применения в самих лазерных излучателях, т.е. жидкостное охлаждение ИП, в принципе, не вносит усложнения в конструкцию и не снижает потребительские свойства путем внесения дополнительных контуров охлаждения.

Повышению эффективности жидкостных систем охлаждения способствует переход от использования ламинарных течений жидкости через теплообменники к удару жидкой струи для усиления теплообмена, капельному орошению поверхности теплообмена, тепловым трубам, принцип действия которых основан на фазовых переходах жидкость-пар.

Модуль ИП представляет собой сложную систему тел с множеством внутренних источников теплоты. Точное аналитическое описание температурных полей внутри модуля невозможно из-за громоздкости задачи и неточности исходных данных: мощности источников теплоты, теплофизических свойств материалов. Поэтому используют: а) ориентировочный выбор способа охлаждения на ранней стадии проектирования ИП; б) приближенные методы анализа и расчета теплового режима модулей ИП. Целью приближенного расчета является определение температур нагретой зоны и поверхности компонентов; знание температур необходимо также для оценки надежности ИП, поскольку надежность кремниевых устройств увеличивается на порядок при уменьшении температуры кристалла на каждые 30...40 ^{o}C от максимально допустимой (125 ^{o}C). Рекомендуется проводить расчет для наиболее критичного компонента, допустимая температура которого имеет наименьшее значение среди всех компонентов, входящих в состав ИП.

5.1. Методика выбора способа охлаждения источника питания

Выбор способа охлаждения ИП на ранней стадии проектирования можно выполнять с помощью графиков, типа приведенного на рис. 5.1 [20], характеризующих оптимальность применения того или иного способа охлаждения. За основной показатель, определяющий области целесообразного применения способа охлаждения принимается значение плотности теплового потока q (Вт/м^2), проходящего через поверхность теплообмена:

$$q = (P_{рас}\, K_p)/S_n\,, \tag{5.4}$$

где $P_{рас}$ – суммарная мощность, рассеиваемая ИП с поверхности теплообмена; K_p – коэффициент, учитывающий давление воздуха (при атмосферном давле-

нии $K_p = 1$); S_n – поверхность теплообмена:

$$S_n = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2) L_3] K_з, \tag{5.5}$$

где L_1, L_2, L_3 - размеры корпуса ИП; $K_з$ – коэффициент заполнения объема корпуса ИП:

$$K_з = \sum_{i=1}^{n} V_i / V, \tag{5.6}$$

где V_i – объем i-го компонента ИП; n –число компонентов ИП; V – объем корпуса ИП.

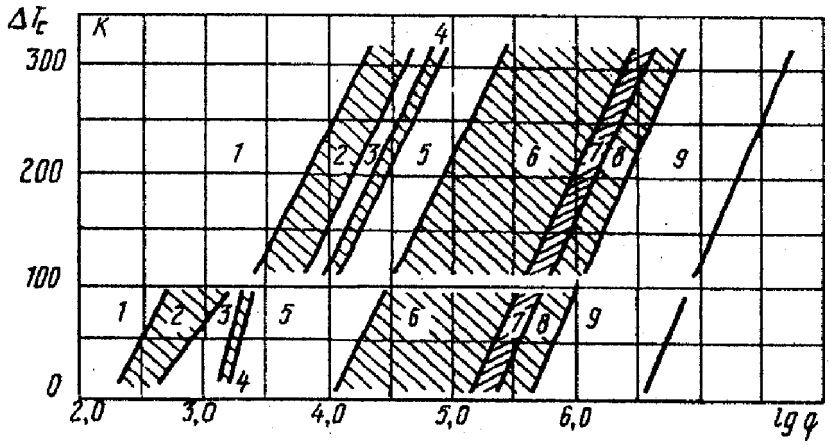


Рис. 5.1. Области целесообразного применения различных способов охлаждения

Вторым показателем служит максимально допустимый перегрев компонентов ΔT_c:

$$\Delta T_c = T_{i\,min} - T_c, \tag{5.7}$$

где $T_{i\,min}$ – допустимая температура поверхности наименее теплостойкого компонента; T_c – температура окружающей среды. Для естественного охлаждения $T_c = T_{c\,max}$, т.е. соответствует максимальной температуре окружающей среды. Для принудительного охлаждения $T_c = T_{вх}$, т.е. температуре охлаждающего воздуха или охлаждающей жидкости на входе в ИП.

На рис. 5.1 приведены области целесообразного применения различных способов охлаждения в координатах ΔT_c, $lg\ q$. Различают два типа областей: области, в которых можно рекомендовать применение определенного типа

охлаждения, и области, в которых с одинаковым успехом можно применять два или три способа охлаждения. Области первого типа не заштрихованы и относятся к следующим способам охлаждения: 1 – естественное воздушное; 3 – принудительное воздушное; 5 – принудительное жидкостное; 9 – принудительное испарительное. Области второго типа заштрихованы: 2 – возможно применение естественного и принудительного воздушного охлаждения; 4 – возможно применение принудительного воздушного и жидкостного охлаждения; 6 – возможно применение принудительного жидкостного и естественного испарительного охлаждения; 7 – возможно применение принудительного жидкостного, принудительного естественного и принудительного испарительного охлаждения; 8 – возможно применение естественного и принудительного испарительного охлаждения.

Высокая эффективность испарительного охлаждения подтверждается сравнением количества тепла, которое отводится 1 кг наиболее теплоемкого и распространенного хладагента – водой $Q_н$, имеющей удельную теплоемкость $c = 4{,}19 \cdot 10^3$ Дж/(кг К), при ее нагревании в процессе теплосъема от температуры плавления до температуры кипения ($\Delta T = 100$ К), с теплом, которое отводится тем же 1 кг воды при ее переходе в парообразное состояние $Q_п$. Удельная теплота парообразования воды при температуре кипения под нормальным давлением $\lambda = 2{,}256 \cdot 10^6$ Дж/кг. Тогда $Q_н = 4{,}19 \cdot 10^5$ Дж, $Q_п = 2{,}256 \cdot 10^6$ Дж, т.е. $Q_п >> Q_н$.

Здесь еще раз демонстрируется, что и в выборе системы охлаждения однозначных конструктивных решений не существует. В качестве дополнительных критериев выбора следует рассматривать в первую очередь назначение ИП и лазера в целом, а также принятую систему охлаждения лазерного излучателя.

5.2. Выбор оптимального способа охлаждения источника питания на ранних стадиях его проектирования

Для того чтобы уже на ранних стадиях проектирования ИП можно было заложить в проект оптимальную систему охлаждения, достаточно воспользо-

ваться достигнутыми на современном этапе развития электроники ИП удельными характеристиками: КПД - $\eta_{ип}$, и удельной объемной мощностью γ_v, и требуемой выходной мощностью $P_{вых.ип}$. Тогда суммарная мощность, рассеиваемая ИП, $P_{рас}$ будет:

$$P_{рас} = (1 - \eta_{ип}) P_{вых.ип} / \eta_{ип}. \quad (5.8)$$

Объем ИП V определяется выходной мощностью и удельной объемной мощностью:

$$V = P_{вых.ип} / \gamma_v . \quad (5.9)$$

Приняв, что корпус ИП имеет форму куба, т.е. $L_1 = L_2 = L_3$, и коэффициент его заполнения $K_з = 1$, получим поверхность теплообмена:

$$S_п = 6\left(P_{вых.ип} / \gamma_V\right)^{2/3} . \quad (5.10)$$

Наконец, подставив (5.10) и (5.8) в (5.4), получим выражение для оценки q при $K_р = 1$:

$$q = \frac{1 - \eta_{ип}}{6 \cdot \eta_{ип}} P_{вых.ип}^{1/3} \cdot \gamma_V^{2/3} . \quad (5.11)$$

Естественно, что в выражении (5.11) можно было бы оставить оба коэффициента $K_з$ и $K_р$, но пришлось бы делать оценки их значений по уже существующим конструкциям, хотя и оценка плотности теплового потока - q в этом случае получилась бы более реалистичной.

Например, требуется выбрать способ охлаждения лабораторного источника питания газоразрядного CO_2-лазера с выходной мощностью излучения 100 Вт с прогнозируемым КПД преобразования мощности накачки 10%. В этом случае выходная мощность источника питания должна составлять $P_{вых.ип}$ = 1000 Вт. Примем значение КПД ИП равным $\eta_{ип} = 0{,}5$ и объемную плотность мощности γ_v = 100 Вт/дм^3 = 10^5 Вт/м^3, максимально допустимый перегрев компонентов ΔT_c = 100 К. Подстановка принятых для оценки плотности теплового потока величин в выражение (5.11) дает значение $q = 3{,}6 \cdot 10^3$ Вт/м^2, а $lg\ q = 3{,}6$.

Точка пересечения прямых $lg\ q = 3{,}6$ и $\Delta T_c = 100$ К на графике, представленном на рис. 5.1, попадает в область 5 принудительного жидкостного охлаждения ИП. Если разработчиками ИП принимается решение о проектировании жидкостной системы охлаждения для него, то может быть оценен объем ИП $V = P_{вых.ип} / \gamma_v = 10$ дм^3 и его линейный размер $L = V^{1/3} = 210$ мм. Источник питания с жидкостной системой охлаждения прогнозируется довольно компактным.

Если жидкостная система охлаждения ввиду сложности ее реализации отвергается, то можно задаться меньшим значением объемной плотности мощности, например, $\gamma_v = 10$ Вт/дм^3 $= 10^4$ Вт/м^3. Тогда имеем $q = 7{,}7 \cdot 10^2$ Вт/м^2 и $lg\ q = 2{,}9$ и попадаем при $\Delta T_c = 100$ К в область 2 (рис. 5.1), где возможны как естественное, так и принудительное воздушное охлаждение. Предусмотрев при проектировании установку в ИП вентилятора для принудительного воздушного охлаждения, объем ИП и его характерный линейный размер оцениваются следующими значениями $V = P_{вых.ип} / \gamma_v = 100$ дм^3, $L = V^{1/3} = 460$ мм, что вполне приемлемо для лабораторной лазерной установки.

Приведенная методика расчета теплового потока, отводимого от ИП, подчеркивает значение удельных характеристик и является основанием для включения их в число параметров, подлежащих оценке в процессе проектирования ИП.

5.3. Обеспечение теплового режима мощных полупроводниковых приборов лазера

Мощные полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, транзисторы, микросхемы с мощными выходными каскадами являются основными тепловыделяющими элементами ИП. Мощные светодиоды и полупроводниковые лазеры применяются для оптической накачки активной среды лазера. Они в большинстве случаев располагаются в лазерном излучателе, выделяют большое количество тепловой энергии и для реализации, заложенного при их использовании ресурсного потенциала, нуждаются в обеспечении требуемого теплового режима.

Основным параметром при расчете теплового режима полупроводникового прибора является температура *p-n*-перехода (T_n) [21]. При этом имеется в виду непосредственно температура области *p-n*-перехода (в диоде) или переходов (в транзисторе или тиристоре) полупроводниковой структуры. Максимальное значение температуры T_n обычно приводится в технической документации на полупроводниковый прибор. Температура *p-n*-перехода в общем случае определяется тремя параметрами: температурой окружающей среды; теплопроводностью между *p-n*-переходом и теплоотводящей поверхностью корпуса полупроводникового прибора; рассеиваемой полупроводниковым прибором электрической мощностью.

При разработке конструкции ИП и лазерного излучателя для обеспечения теплового режима полупроводниковых приборов необходимо руководствоваться следующими основными положениями: увеличение теплопроводности между радиатором и теплоотводящим основанием корпуса полупроводникового прибора, т.к. ее величина непосредственно влияет на перепад температуры и эффективность отвода тепла, а следовательно и размер радиатора; расположение радиатора в корпусе ИП должно обемпечивать беспрепятственную естественную или принудительную конвекцию хладагента (чаще всего, воздуха), в противном случае эффективность теплосъема будет недостаточной; минимизация температуры внутри корпуса ИП, т.к. именно эта температура будет являться температурой окружающей среды для полупроводникового прибора; минимизация значений плотности распределения тепла внутри корпуса ИП и тепла на радиаторе с группой установленных на нем полупроводниковых приборов.

Оценка параметров конструктивных элементов, обеспечивающих заданный тепловой режим полупроводникового прибора ИП, проводится с помощью тепловой модели, основанной на понятии теплового сопротивления. Поскольку расчет ведется для стационарного теплового режима, то тепловое сопротивление тепловому потоку R_T^{1-2}, распространяющемуся от тела с большей температурой T_1 к телу с меньшей T_2, определяется как отношение разности температур тел к мощности P, рассеиваемой нагретым телом, в ^{o}С/Вт:

$$R_T^{1-2} = (T_1 - T_2)/P \,. \qquad (5.12)$$

Для полупроводникового прибора в стационарном тепловом режиме P есть джоулево тепло, выделяющееся в силовом p-n-переходе, при протекании через него электрического тока I и падении напряжения на нем U. При расчете P полупроводникового прибора с двумя выводами (диода, динистора, светодиода, полупроводникового лазера) используются эффективные значения тока и напряжения при открытом состоянии p-n-перехода. Хотя в светодиоде или полупроводниковом лазере часть электрической энергии, закачиваемой в p-n-переход, уносится в форме излучения и не требует рассеяния в окружающей среде, в большинстве случаев этот унос энергии излучением не учитывается, что позволяет создать определенный конструктивный запас по теплоотводу. При расчете P управляемых полупроводниковых приборов с тремя и более выводами (транзисторов, тиристоров, симисторов и т.п.) не учитывается мощность, потребляемая управляющим электродом. Поэтому для биполярного транзистора роль P играет мощность, рассеиваемая коллекторным p-n-переходом, для полевого транзистора – мощность, выделяющаяся в канале между истоком и стоком.

Модель, основанная на понятии теплового сопротивления удобна тем, что тепловыми сопротивлениями можно оперировать аналогично электрическим сопротивлениям. Это повышает наглядность модели и упрощает расчеты. В расчете теплового режима полупроводникового прибора обычно фигурируют три тепловых сопротивления: $R_T^{n-к}$ – тепловое сопротивление между p-n-переходом и теплоотводящим основанием корпуса прибора; $R_T^{к-р}$ – тепловое сопротивление между теплоотводящим основанием и радиатором, на котором установлен прибор; R_T^{p-c} – тепловое сопротивление между радиатором и окружающей средой. Эти тепловые сопротивления включены последовательно, а результирующее тепловое сопротивление R_T^{n-c} между p-n-переходом и окружающей средой равно их сумме:

$$R_T^{n-c} = R_T^{n-к} + R_T^{к-р} + R_T^{p-c} \,. \qquad (5.13)$$

Тепловое сопротивление между *p-n*-переходом и теплоотводящим основанием корпуса прибора - $R_T^{n\text{-}к}$ - всегда указывается в технической документации на прибор, поэтому является справочным и относительно точно известным параметром. Тепловое сопротивление между радиатором и окружающей средой - $R_T^{р\text{-}с}$ - для радиаторов серийного производства при выполнении рекомендаций по его размещению в электронном блоке также известно с достаточной для инженерной практики точностью. Так как тепловое сопротивление между теплоотводящим основанием и радиатором - $R_T^{к\text{-}р}$ – зависит от шероховатости и плоскостности соприкасающихся поверхностей основания прибора и радиатора, равномерности и усилий затяжки болтов крепления прибора на радиатор, наличия на них окисных пленок и загрязнений, то рекомендуется в ответственных случаях или серийном производстве проводить экспериментальное определение значения $R_T^{к\text{-}р}$, измеряя температуры теплоотводящего основания полупроводникового прибора и соприкасающейся с ним поверхности радиатора. Снизить влияние качества обработки соприкасающихся поверхностей и усилия затяжки болтов на тепловое сопротивление их контакта помогают специальные силиконовые смазки, которыми промазываются соприкасающиеся поверхности при креплении полупроводникового прибора на радиатор. Невысыхающие силиконовые смазки с малым тепловым сопротивлением, заполняя пустоты между неровностями соприкасающихся поверхностей, обеспечивают хороший и долговременно стабильный тепловой контакт между ними.

Часто в качестве радиатора используется стенка корпуса ИП или один радиатор служит охладителем группы полупроводниковых приборов, корпуса которых имеют разные электрические потенциалы. В подобных случаях необходимо электрически изолировать теплоотводящее основание прибора от радиатора. Для этой цели используют тонкие слюдяные прокладки или прокладки из бериллиевой керамики, в которых сочетаются высокие значения теплопроводности и удельного электрического сопротивления. При использовании прокладок в выражение (5.13) следует добавить еще одно слагаемое – тепловое сопротивление прокладки.

Исходными данными для теплового расчета радиатора являются максимальные температуры *p-n*-перехода T_{n_max} и окружающей среды T_{c_max}. Если тепловая система радиатор+прибор находятся в замкнутом объеме корпуса ИП, то в качестве T_{c_max} необходимо брать температуру внутри корпуса. В качестве T_{n_max} рекомендуется взять максимальную температуру *p-n*-перехода из технической документации на полупроводниковый прибор, умноженную на коэффициент запаса $K_{зап}$. Это позволит в реальных условиях снизить вероятность перегрева кристалла и обеспечить требуемый ресурс работы лампы. Значение коэффициента $K_{зап}$ обычно выбирают в пределах 0,7…0,8.

По заданным значениям температур определяется результирующее тепловое сопротивление *p-n*-переход – окружающая среда:

$$R_{T_рез}^{n\text{-}c} = (T_{n_max} - T_{c_max})/P\ , \tag{5.14}$$

где P – мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором.

Следующий шаг – определение требуемого теплового сопротивления радиатора $R_T^{p\text{-}c}$. При этом предполагается, что величины $R_T^{n\text{-}к}$ и $R_T^{к\text{-}p}$ известны. Тогда требуемое тепловое сопротивление радиатора рассчитывается как разность:

$$R_T^{p\text{-}c} = R_{T_рез}^{n\text{-}c} - R_T^{n\text{-}к} - R_T^{к\text{-}p}\ . \tag{5.15}$$

По известному значению $R_T^{p\text{-}c}$ либо выбирается из справочной литературы, например, [22] стандартный радиатор с тепловым сопротивлением

$$R_{T_рад} \le R_T^{p\text{-}c}\ , \tag{5.16}$$

либо производится расчет оригинального радиатора на заданное тепловое сопротивление, удовлетворяющее неравенству (5.16).

5.4. Вентиляторы для принудительного конвекционного теплоотвода мощных полупроводниковых приборов лазера

Известно, что в условиях свободного конвекционного теплоотвода в наземных условиях необходим радиатор с площадью поверхности примерно 25 см^2 на каждый ватт рассеиваемой мощности, в условиях инерциального по-

лета в космическом пространстве свободный конвекционный теплоотвод вообще невозможен. Чтобы не увеличивать габариты, но повысить эффективность теплоотвода, применяют принудительную конвекцию [23]. Струя воздуха от вентилятора с температурой окружающей среды, обтекая электронные компоненты, уносит с собой избыточное тепло, повышая эффективность охлаждения. С развитием и миниатюризации аппаратуры вентиляторы стали компактнее, снизилась их потребляемая мощность, они почти не шумят, увеличился их рабочий ресурс.

Совершенствование технологии в электротехнике и машиностроении привело к созданию миниатюрных электродвигателей и вентиляторов на их основе. Сегодня серийно производятся вентиляторы самых разных габаритов, в том числе сверхминиатюрные, сравнимые с размерами микросхем, которые они охлаждают. В большинстве случаев миниатюрные вентиляторы, предназначенные для локального охлаждения отдельных микросхем и полупроводниковых приборов, устанавливаются на радиаторы, примыкающие, в свою очередь, к поверхности охлаждаемого компонента. Единый блок, состоящий из радиатора со смонтированным на нем вентилятором, называется кулером. Наибольший эффект принудительного конвективного охлаждения достигается сочетанием общей вентиляции блока ИП с локальным обдувом отдельных наиболее разогретых его элементов. Однако кулеры сравнительно дорогостоящие изделия. Без серьезных оснований в серийную аппаратуру их не ставят, отдавая предпочтение более дешевым техническим решениям общей вентиляции блока.

В радиоэлектронной аппаратуре в основном нашли применение (в порядке распространенности) осевые (аксиальные), центробежные радиальные (бловеры) и диагональные вентиляторы. Первичными параметрами вентиляторов, которые определяют их пригодность для решения задач охлаждения ИП, являются: производительность или расход, статическое давление, потребляемая электрическая мощность, напряжение питания, габариты и масса. Для выбора оптимального варианта конструкции к первичным параметрам добавляются наличие встроеннных схем управления и защиты, тип выходного ста-

тусного сигнала, уровень шума, тип и число подшипников и т.д. Производительностью вентилятора называется объем перемещаемого вентилятором воздуха за единицу времени при отсутствии противодавления и механических препятствий выходной струе вентилятора. Статическое давление – это разность между давлением воздушного потока вентилятора и атмосферным давлением при работе вентилятора с закрытым выпуском. Оно чаще всего измеряется в миллиметрах водяного столба.

Наиболее распространенный тип вентиляторов в системах охлаждения ИП – осевые вентиляторы. Представление о внешнем виде осевых вентиляторов можно получить, вскрыв корпус ИП любого современного компьютера. Свое название они получили за то, что создаваемый ими воздушный поток движется параллельно оси вращения крыльчатки. Эти вентиляторы предназначены для создания больших воздушных потоков, но они бывают недостаточно эффективны в плотно закрытых корпусах ИП, т.к. неспособны создавать в них большое статическое давление.

Радиальные вентиляторы всасывают воздух через центральное осевое отверстие и выталкивают его радиально по всей окружности крыльчатки. Воздух выбрасывается лопастями рабочего колеса в момент, когда он разгоняется до максимальной круговой скорости. Спирально расширяющийся корпус - воздуховод направляет воздух в нужную сторону и преобразует высокую скорость движения потока в высокое статическое давление. Радиальные вентиляторы по сравнению с осевыми создают меньшие воздушные потоки, но большее статическое давление. Используются они в конструкциях ИП, где имеются многочисленные перегородки и крупные компоненты, т.е. там, где существует высокое сопротивление воздушной среды.

Диагональные вентиляторы занимают промежуточное положение между осевыми и радиальными и являются своеобразным гибридом, созданным на основе этих двух типов. В них использованы как эффект «засасывания» воздуха лопастями осевых вентиляторов, так и принцип центробежного ускорения радиальных вентиляторов. В результате получается поток, почти равный тому, что имеют осевые вентиляторы, и вместе с тем удается достичь высоко-

го статического давления, присущего радиальным вентиляторам. Отличительная черта диагонального вентилятора – коническая ступица ротора. Серцевина ротора, сделанная в форме усеченного конуса, имеет маленькое сечение в зоне входа и увеличенный диаметр на стороне выброса. Более высокая круговая скорость движения кончиков лопастей придает более высокое центробежное ускорение воздуху.

В конструкциях современных миниатюрных вентиляторов статор и ротор электродвигателя поменялись местами. Статор с обмотками находится в центральной части двигателя, тогда как ротор вращается снаружи. Он же служит основанием крыльчатки. В электродвигателях постоянного тока вентиляторов нет коллектора и угольных щеток. Ротор представляет собой постоянный магнит, а коммутация тока в обмотках статора выполняется электронной схемой. Плата управления встраивается в электродвигатель и не требует дополнительного места. Момент переключения токов в обмотках статора определяется при помощи датчиков магнитного поля на эффекте Холла. Поскольку мощность электродвигателей невелика, то в схеме удается обойтись без мощных транзисторов и диодов. Электронная схема выполняет коммутацию токов, но может также иметь датчики температуры, схемы защиты двигателя от перегрузок, датчики скорости вращения ротора. Встроенная схема совместно с внешней управляющей системой позволяет гибко регулировать скорость вращения ротора, меняя ее в зависимости от состояния охлаждаемой аппаратуры. Благодаря современной компоновке вентилятора обеспечиваются хорошее воздушное охлаждение его электродвигателя и высокий крутящий момент. К дополнительным преимуществам данной конструкции следует отнести сравнительную легкость выполнения модификаций вентиляторов на базе одного типоразмера.

Поведение вентиляторов описывается характеристической кривой – зависимостью статического давления, вызванного сопротивлением среды, от величины воздушного потока (рис. 5.2). При использовании каскадирования вентиляторов следует помнить, что параллельная работа двух одинаковых вентиляторов позволяет получать удвоение воздушного потока при одинако-

вом статическом давлении, а последовательная установка вентиляторов позволяет удвоить статическое давление в системе (при нулевом воздушном потоке).

При разработке системы принудительного конвективного теплоотвода ИП необходимо определить количество теплоты, которое должно быть отведено из корпуса ИП для заданного допустимого превышения температуры внутри него по отношению к температуре окружающей среды, и интенсивность воздушного потока, необходимого для удаления этого избыточного тепла при заданном превышении температуры.

Первая задача легко решается исходя из потребляемой ИП мощности, КПД ИП и обоснования допустимого превышения температуры воздуха внутри корпуса ИП. Приближенное решение второй задачи – определение воздушного потока, создаваемого вентилятором, - может быть осуществлено на основании диаграмм типа представленной на рис. 5.3, которая отражает опыт конструирования электронной аппаратуры.

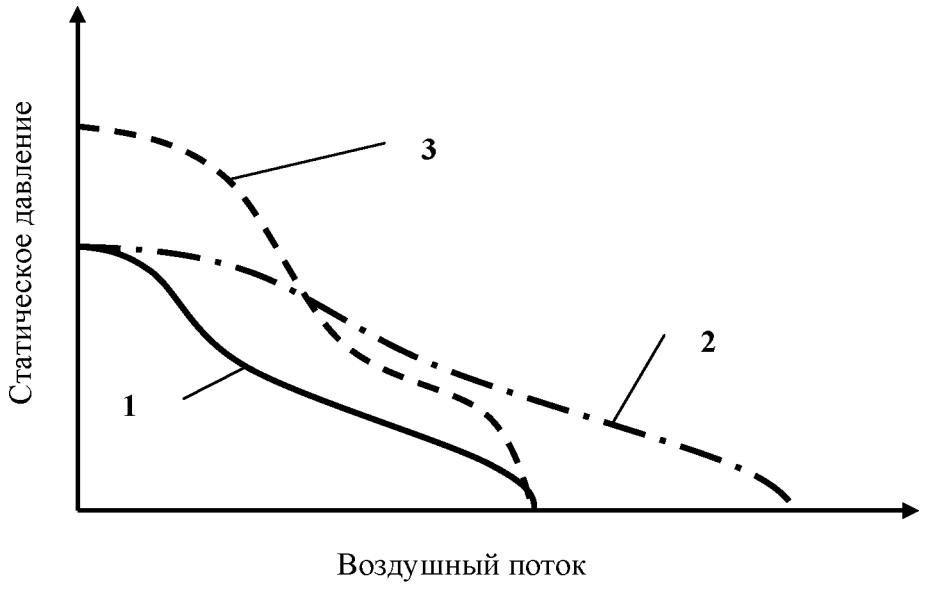


Рис. 5.2. Характеристическая кривая вентилятора: 1 - один вентилятор; 2 - два одинаковых параллельно работающих вентилятора; 3 - два одинаковых последовательно работающих вентилятора

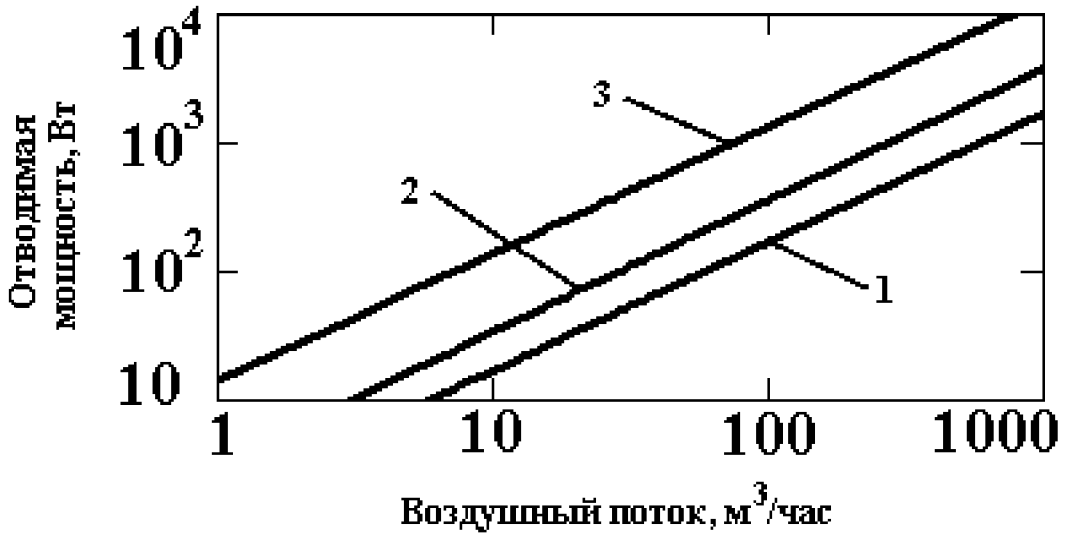


Рис. 5.3. Диаграмма для определения воздушного потока: 1 - превышение температуры отводимого из корпуса ИП воздуха над температурой окружающей среды 5°С; 2 - 10 °С; 3 - 40 °С

При выборе вентилятора следует помнить, что их производительность, указанная в технических характеристиках, определяется при нулевом статическом давлении, а реальная работа происходит при давлении отличном от нуля. Поэтому для закрытой конструкции рекомендуется выбирать вентилятор, имеющий производительность на 20…30 % выше расчетной.

Эффективность работы воздушных систем охлаждения определяется умением правильно оценить реальные условия работы аппаратуры. Принудительное охлаждение струей воздуха достигается или откачкой горячего воздуха из корпуса (с вентилятором на выпускной стороне), или нагнетанием наружнего воздуха (с вентилятором на входной стороне). На ранних этапах проектирования аппаратуры должно быть решено, какой именно тип вентиляции (нагнетающий или вытяжной) наиболее удобен в данном конкретном случае, и должны быть продуманы размеры и местоположение впускных и выпускных отверстий в корпусе, а также расположение электронных компонентов по отношению к воздушному потоку.

Нагнетающий вентилятор образует направленный воздушный поток внутри корпуса ИП. Он начинается от выходного отверстия вентилятора и простирается вглубь в направлении оси вращения крыльчатки. Воздух, подающийся вентилятором, может быть отфильтрован, а создание избыточного

давления внутри корпуса не позволяет пыли проникать через щели. При проектрировании конструкции ИП необходимо разместить компоненты таким образом, чтобы наиболее горячие из них попали в охлаждающий поток, т.к. компоненты, остающиеся вне потока, могут перегреваться. Важно избежать возникновение застойных зон, в которых воздух может перегреваться. К недостаткам нагнетающей вентиляции можно отнести дополнительный нагрев поступающего воздуха двигателем вентилятора.

В корпусе ИП, оборудованном вытяжным вентилятором, возникает небольшое разрежение, а подсос воздуха происходит через отверстия в корпусе, которые и следует расположить оптимальным образом. В корпусе образуется несколько воздушных струй, в каждой из которых и следует размещать самые горячие компоненты. Для равномерного охлаждения больших объемов внутри корпуса части стенок корпуса выполняются сетчатыми. При вытяжном методе охлаждения образуется меньше застойных зон, а тепло, выделяемое самим электродвигателем вентилятора в корпусе ИП не рассеивается. Правда, сам вентилятор в этом случае работает в струе нагретого воздуха, что сокращает срок его службы.

6. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

Поскольку температура активной среды непосредственно влияет на параметры излучения лазера, а ее нестабильность определяется системой охлаждения, то при разработке системы охлаждения необходимо предусматривать контроль температуры как активной среды, так и хладагента путем установки датчиков температуры – преобразователей значений температуры в электрический сигнал. Кроме того, датчики температуры служат чувствительными элементами контуров автоматического регулирования или стабилизации температуры. Причем, по мере миниатюризации и удешевления серийных компонент систем автоматического регулирования, они устанавливаются на лазерные установки все меньшей мощности, существенно не отражаясь на их массогабаритных, энергетических и экономических показателях.

Диапазон рабочих температур активной среды нашедших практическое применение лазеров составляет 200…600 К, а в большинстве случаев ее температура несущественно отличается от комнатной. Диапазон температур теплового резервуара – окружающей среды, в которую, в конечном итоге, и сбрасывается избыточное тепло еще уже и составляет всего 220…320 К. Диапазон температур 200…600 К наиболее востребован в производственной практике. Поэтому именно для него и создано наибольшее количество разнообразных по физическим принципам преобразования «температура $\Rightarrow$ электрический сигнал» датчиков. Вследствие этого многообразия по датчикам температуры существует обширная литература [24, 25]. Задача конструктора современных лазерных установок – использование имеющегося арсенала в практике конструирования и модернизации лазерного оборудования.

Для указанного диапазона температур 200…600 К по совокупности таких технико-экономических показателей, как долговременная стабильность, воспроизводимость показаний, унификация присоединительных размеров и выходных сигналов, взаимозаменяемость, доступность предпочтение следует отдать платиновым термометрам сопротивления и хромель-копелевым или хромель-алюмелевым термопарам. При применении термопар массового производства следует помнить, что их градуировочные характеристики нормируются лишь для температур выше 0 °С.

При сужении температурного диапазона до 220…400 К спектр отработанных в практическом применении датчиков температуры существенно расширяется за счет медных и полупроводниковых термометров сопротивления, а также датчиков, принцип действия которых основан на изменении падения напряжения на прямосмещенном *p-n*-переходе кремниевых диодов или транзисторов.

6.1. Термопреобразователи сопротивления

Промышленность России традиционно выпускает два вида термопреобразователей сопротивления (ТС), отличающихся материалом проволоки чувствительного элемента, платиновые (ТСП) и медные (ТСМ) [26]. Зависимость сопротивления ТСП и ТСМ от температуры близка к линейной. Каждый из видов ТС имеет свои градуировки (см. табл. 6.1), которым соответствует определенное значение сопротивления при 0°С (R_0). Сами стандартные градуировки приводятся в литературе в виде таблиц значений сопротивления с шагом в 1°С. По конструкции и применению ТС классифицируют: по назначению (погружаемые, поверхностные, комнатные); по защищенности от воздействий внешней среды со стороны выводов (обыкновенные и взрывобезопасные); по герметичности по отношению к измеряемой среде (обыкновенные и герметичные); по устойчивости к механическому воздействию (обыкновенные, вибротряскоустойчивые и ударопрочные); по инерционности (большой инерционность (БИ), средней инерционность (СИ) и малоинерционные (МИ)); по точности (I, II, III класса).

Таблица 6.1

Номера стандартных градуировок термометров сопротивления

Вид ТС	Градуировка	R_0 (Ом)
ТСП	20	10
ТСП	21	46
ТСП	22	100
ТСМ	23	53
ТСМ	24	100

Определяющими свойствами ТС являются инерционность и класс точности. Инерционность характеризуется показателем тепловой инертности. Показатель тепловой инерции ТС представляет собой время, необходимое для того, чтобы при внесение ТС в исследуемую среду с постоянной температурой, относительная разность температуры среды и любой точки ТС составила 0,37 значения температуры, которая имела исследуемая среда (e^{-1} = 0,3679). Показатель тепловой инерции τ не должен превышать следующие значений: для ТС БИ – 4 минуты; для ТС СИ – 1 мин. 20 с; для ТС МИ – 9 с.

$$|T_{ср.} - T_{ТС}(t)| / |T_{ср.} - T_{ТС.\,нач.}| \le exp(-t/\tau), \qquad (6.1)$$

где $T_{ср.}$ – температура среды, которая предполагается постоянной, по крайней мере за промежуток времени, необходимый для проведения измерения; $T_{ТС}(t)$ – температура термометра сопротивления через промежуток времени t после его внесения в измеряемую среду (или после его контакта с измеряемой средой); $T_{ТС.\,нач.}$ – начальная температура термометра, т.е. температура термометра до его помещения в измеряемую среду.

Например, если с помощью малоинерционного термометра сопротивления (τ = 9 с), находящегося до начала измерений при комнатной температуре $T_{ТС.\,нач.}$ = 20 °С, требуется измерить температуру жидкости близкой к температуре кипения воды при атмосферном давлении $T_{ср.}$ = 100 °С с погрешностью по причине инерционности термометра, не превышающей 1 °С, т.е. $|T_{ср.} - T_{ТС}(t)|$ = 1 °С, то до начала отсчета температуры его следует поместить в жидкость на время:

$$t = \tau \ln (|T_{ср.} - T_{ТС.\,нач.}| / |T_{ср.} - T_{ТС}(t)|) = 9 \ln 80 = 39{,}4 \text{ (с)}. \qquad (6.2)$$

Подобные оценки всегда полезно производить до начала измерений, т.к. они очерчивают временные рамки эксперимента.

Различие параметров термометров сопротивления в зависимости от их класса приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Точностные параметры термометров сопротивления

Тип	Класс	$\Delta R_0 / R_0$ (0^0C)	R_{100}/R_0
ТСП	I	±0,05%	1,3910±0,0007
ТСП	II	±0,1%	1,391±0,001
ТСМ	II	±0,1%	1,426±0,001
ТСМ	III	±0,1%	1,426±0,002

Из табл. 6.2 видно, что для использования полного потенциала точности ТС 1-го класса следует выбирать омметр, имеющий разрешающую способность не менее 5 значащих цифр. Чувствительность платиновых термометров сопротивления 0,00391 $К^{-1}$, медных – 0,00426 $К^{-1}$.

С развитием тонкопленочной технологии в 70-х годах на массовом рынке появились ТСП в тонкопленочном исполнении. Они представляют собой пленочные резсторы в форме меандра, выполненные из платины. Им также, как и проволочным ТСП свойственна долговечность, высокая надежность и долгосрочная стабильность. Максимальный дрейф номинального сопротивления после 1000 ч при 500° С составляет 0,04 % [27].

Тонкопленочное исполнение ТСП, в отличие от проволочных, позволяет производить датчики этого типа с номинальным сопротивлением не только 100 Ом, но и с сопротивлением при 0° С 200, 500, 1000 Ом и даже 10000 Ом. Тонкопленочные ТСП имеют малые габариты, что способствует увеличению их быстродействия. Так датчик М 213 фирмы *Heraeus Sensor Technology* имеет размеры 1,2 × 1,7 × 1,0 мм и максимальное время срабатываения в воде, движущейся со скоростью 0,4 м/с, 0,12 с, а в потоке воздуха, движущегося со скоростью 2,0 м/с, - 7,0 с.

Полупроводниковые преобразователи сопротивления изготавливают из смесей поликристаллических полупроводниковых оксидов металла (MgO, $MgAl_2O_4$, Mn_2O_3, Fe_3O_4, NiO, $ZnTiO_4$). Изменение их сопротивления с температурой характерно для полупроводниковых материалов:

$$R(T) = R_0 \exp\left[B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right], \qquad (6.3)$$

где T и T_0 – абсолютные температуры, R_0 – сопротивление термистора при температуре T_0, B – некоторая постоянная для конкретного термосопротивления величина, имеющая размерность температуры. Хотя зависимость $R(T)$ для термисторов нелинейна, и градуировочные характеристики не воспроизводимы от экземпляра к экземпляру, но их чувствительность при температуре вблизи 0^o С, как минимум, на порядок выше чем металлических термометров сопротивления.

Конструктивно полупроводниковые термометры сопротивления могут быть выполнены с большим разнообразием, чем металлические, в виде дисков, стержней, шариков и т.п. Их легко миниатюризировать, встроить в микросхемы, получить любой номинал при начальной температуре. Ярко выраженная нелинейная зависимость сопротивления от температуры, хотя и создает определенные неудобства при измерениях, но при использовании полупроводникового терморезистора в качестве датчика системы автоматического регулирования, он способен обеспечить меньшие погрешности системы.

6.2. Термоэлектрические преобразователи

В основе работы термопар - термоэлектрических преобразователей лежит термоэлектрический эффект Зеебека. Он заключается в том, что в замкнутой цепи, состоящей из двух различных проводников A и B, спаи которых находятся при различных температурах, возникает электрический ток (рис. 6.1).

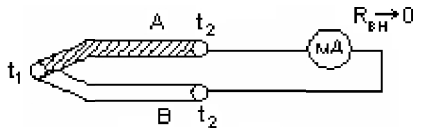
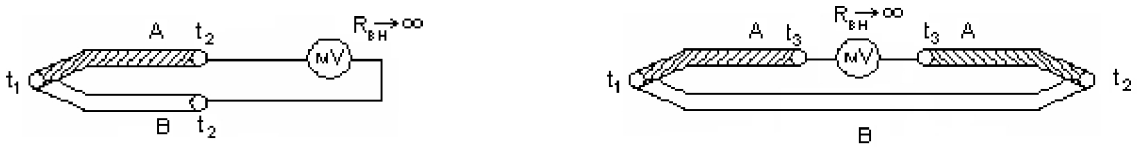


Рис. 6.1. Схема генерации и регистрации термоэлектрического тока

Термопары, нашедшие практическое применение, изготавливают из металлов, поэтому: а) трудно создать миллиамперметр с внутренним сопротивлением пренебрежимо малым по сравнению с сопротивлением других участков измерительной цепи; б) любые неоднородности материалов проводников и нестабильность сопротивлений мест их соединений будут сказываться на величине тока. Все это приводит к тому, что на практике измеряется не значение тока, а разность потенциалов (термо-э.д.с.) между разомкнутыми холодными концами проводников или в разрыве между частями одного из термоэлектродов (рис. 6.2). С другой стороны, измерение термо-э.д.с., есть измерение напряжения. Оно предполагает применение приборов с $R_{вн} \to \infty$, токи в цепи малые и влияние неоднородности на измеряемую величину сводится к минимуму. Термо-э.д.с. для данной пары проводников A и B зависит только от значений абсолютных температур t_1 и t_2 и не зависит от длины и диаметра термоэлектродов, а также от их удельных сопротивлений.



а) б)

Рис. 6.2. Схемы подключения регистрирующего милливольтметра для измерения термо-э.д.с. термопар

Термо-э.д.с., развиваемая термопарой невелика (10…60 мкВ/К), но все же достаточна для того, чтобы произвести ее измерение с необходимой для практических целей точностью с помощью милливольтметра или потенциометра. Поскольку термопара – источник термо-э.д.с., то она представляет собой активный датчик. Ввиду отсутствия строгой количественной теории явления Зеебека, для зависимости термо-э.д.с. от температуры используется интерполяционная формула:

$$E_{AB} = At + Bt^2 + Ct^3 \ , \qquad (6.4)$$

где E_{AB} – э.д.с. развиваемая термопарой, $t = t_1 - t_2$ – разность температур между горячим и холодным спаями, A, B и C в выражении (6.4) - константы. В узком диапазоне температур 100 К достаточным оказывается учет линейного слагаемого, а в широком температурном интервале наряду с общей формулой (6.4) широко используют стандартные градуировочные таблицы с шагом по температуре в 1° С, определяя промежуточные значения посредством линейной интерполяции.

Термопары просты по конструкции и в изготовлении. Массу спая, а следовательно, и его теплоемкость можно сделать незначительной, чтобы обеспечить малую постоянную времени. На существующих материалах термопарный принцип позволяет измерять температуру в диапазоне 20…3000 К с точностью, не уступающей точности других методов. Последовательно соединенные термопары – термобатареи – дают возможность определять разность температур в тысячные доли градусов. Термопары недороги (особенно изготовленные из неблагородны металлов и предназначенные для измерения средних температур 200…600 К) и надежны в эксплуатации.

Конструктивное оформление термопар должно соответствовать условиям эксплуатации по защищенности и стойкости (чехлы, заполнение, материалы, способы крепления). Термоэлектроды в большинстве случаев соединяют сваркой, предварительно скручивая их друг с другом. В отношении точности термопары уступают термопреобразователям сопротивления. Это объясняется неоднородностью материала термоэлектродов, процессами рекристаллизации,

влиянием механических деформаций и, чаще всего, неточностью термостатирования «холодных» опорных спаев. Действие последнего фактора частично нейтрализуется в современных «интеллектуальных» термопреобразователях включением в их схемы датчиков температуры «холодных» спаев.

Для измерения температуры в пределах 73…1850 К в производственных условиях применяются стандартные технические термопары с металлическими термоэлектродами. В России ГОСТами предусмотрено изготовление термопар с градуировками ПП – платино-платинородиевый 10; ПР-30/6 – платинородий 30 - платнородий 6; ХА – хромель-алюмель; ХК – хромель-копель и ВР-5/20 – вольфрам 5 - рений 20. В других странах стандартизованы термопары и из других сплавов, но могут отсутствовать некоторые из российских. Например, в США и Германии стандартизованы медь-константановые термопары, но не стандартизованы хромель-копелевые.

Конструктивно серийные термопары выполняются аналогично термопреобразователям сопротивления: внешний металлический кожух, керамический стержень с отверстиями для термопроводов, засыпка порошковыми высокотемпературными окислами. И классифицируются по эксплуатационным свойствам они аналогично термопреобразователям сопротивления они аналогично: по назначению и условиям эксплуатации – на погружаемые и поверхностные; по защищенности, по герметичности и т. д. и т. п.

Несмотря на то, что в России гостированы лишь 5 типов термопар, практическое применение в системах охлаждения благодаря высоким значениям термо-э.д.с и доступности материалов находят медь-константановые (73…623 К) и железо-константановые (73…900 К) термопары.

В области стандартных градуировок и средних погрешностей при проектировании систем охлаждения лазеров следует ориентироваться, в первую очередь на серийные термопары: хромель-копель (-50…+500 ^{o}C; 82 мкВ/К) и хромель-алюмель (-50…+1300 ^{o}C; 40 мкВ/К). Причем хромель-копелевая термопара имеет наибольшую чувствительность из распространенных. Ее термо-э.д.с. выше, чем у медь-константановых и железо-константановых. Если требуется долговременная стабильность и можно пожертвовать потерей чувстви-

тельности или восполнить потерю чувствительности в регистрирующей аппаратуре, то предпочтение следует отдать платино-платинородиевым термопарам (0…+1600 °С; 10 мкВ/К).

В отличие от термометров сопротивления термо-э.д.с. термопар зависит от разности температур горячего (рабочего) и холодного (опорного) спаев. Это обстоятельство, наряду с тем фактом, что в градуировочных таблицах приводятся термо-э.д.с. для температуры холодного спая равной 0° С, должны непременно учитываться при применении термопар. Получили распространение три способа учета температуры холодного спая.

Первый способ, самый простой в том смысле, что достаточно измерить термо-э.д.с. и воспользоваться градуировочной таблицей, состоит в термостабилизации холодного спая при температуре 0° С. Хотя в лабораторных условиях этот способ часто применяется путем погружения холодного спая в термостат (термос) со смесью воды со льдом, но в производственных условиях такая простая реализация не всегда удобна в эксплуатации, а другие, основанные, например, на холодильниках Пелтье технически сложны.

Второй способ заключается в поддержании холодного спая при стабильной и известной температуре, не на много превышающей комнатную. В этом случае измеряется термо-э.д.с. $E(t_1 / t_2)$, где t_1 - измеряемая температура, t_2 - постоянная температура опорного спая. Так как t_2 известна, то по градуировочным таблицам находят $E(t_2 / 0\ ^oC)$. Далее складывают измеренное значение $E(t_1 / t_2)$ с найденным из таблиц $E(t_2 / 0\ ^oC)$, то есть находят:

$$E(t_2 / 0\ ^oC) = E(t_1 / t_2) + E(t_2 / 0\ ^oC) \qquad (6.5)$$

и вновь обращаются к градуировочным таблицам для нахождения t_1. Естественно, что эта процедура, особенно в цифровом варианте, просто автоматизируема. Для удобства и простоты поддержания выбирают t_2 = 40…60° С, то есть чтобы она не была слишком высокой и не требовала для своего поддержания больших энергозатрат, но и была недостижимой окружающей средой в лабораторных или цеховых условиях. В третьем способе каким-либо датчиком дополнительно измеряется температура холодного спая, которая учитывается по методике второго способа с помощью выражения (6.5).

При удаленном расположении объекта измерения с термопарой-датчиком от регистрирующего прибора возникают проблемы их соединения друг с другом, т.к. при большом (> 1 м) удалении выходных клемм термопары от входных клемм регистратора трудно обеспечить их изотермичность. Соединение обычными медными проводами при разности температур в несколько градусов вызывает появление паразитных термо-э.д.с. и, тем самым дополнительных погрешностей измерения температуры. Кроме того, при использовании третьего способа учета температуры холодного спая измерять температуру опорного спая удобнее в месте расположения регистрирующего прибора, а не термопары. Поэтому, когда термопара изготовлена из дешевых материалов (ХК или ХА), то и соединения производят теми же проводами. При этом допустимо применение материалов не термопарного качества, что не вызывает больших погрешностей. Здесь важно осуществить соединение хромельного соединительного провода с хромельным выводом термопары, а копельного – с копельным выводом.

Когда термопары изготовлены из платины и платинородия, то используют специальные компенсационные провода из сплава ТП (99,4% Cu; 0,6% Ni) в паре с медным проводом, т.к. термо-э.д.с. термопары ТП-Cu при разности температур в 100° С составляет 0,64 мВ, что в точности равно термо-э.д.с. 10% платинородиевой термопары. Схема подключения - на рис. 6.3.

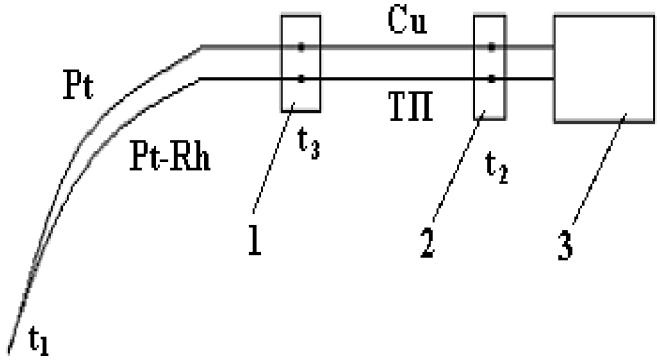


Рис. 6.3. Схема подключения регистрирующего прибора через компенсационные провода:1 - выходные клеммы термопары; 2 - входные клеммы регистрирующего прибора; 3 - регистрирующий прибор

Термопреобразователи сопротивления из медной и платиновой проволоки и термопарные ХА, ХК, ППР и в настоящее время являются наиболее распространенными датчиками температуры современных средств измерения и управления температурой. Типовое внешнее исполнение их показано на рис. 6.4. Защитная арматура чувствительного элемента выполняется из сплавов: 12Х18Н10Т (≤ 800° С), 10Х17Н13М2Т (≤ 900° С), ХН78Т (≤ 1000° С). Материал корпуса соединительной головки – алюминиевый сплав АК12.

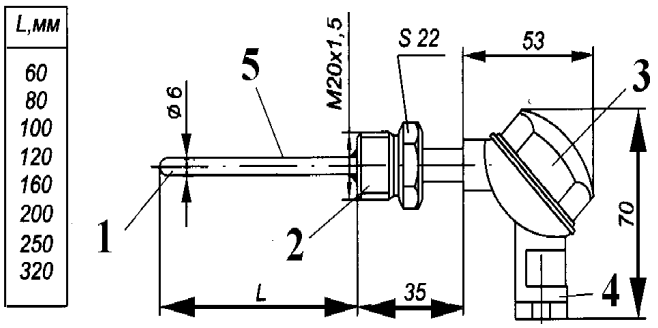


Рис. 6.4. Вариант исполнения серийных термопреобразователей сопротивления и термопар: 1 - зона расположения чувствительного элемента; 2 - присоединительный штуцер; 3 - соединительная головка; 4 - уплотнитель присоединительного кабеля; 5 - защитный кожух

В отличие от традиционных термопреобразователей соединительная головка последних поколений датчиков начиняется электроникой, возможности которой позволяют производителям охарактеризовать свои датчики как интеллектуальные. Интеллектуализация датчиков состоит в том, что на их выходе формируется сигнал 4…20 мА или 0…5 мА, а не микровольты или изменения сопротивления. Выходной сигнал может быть и цифровым. Наиболее полно интеллектуальные способности датчика проявляются при использовании цифрового выходного сигнала. Но производители вынуждены выпускать датчики с комбинированным выходным сигналом для согласования с установленными аналоговыми измерительными и управляющими системами.

Однако и при аналоговом выходном сигнале встроенный электронный модуль способен осуществлять: а) перенастройку диапазона измерения темпе-

ратуры; б) детектирование обрыва ил короткого замыкания первичного термопреобразователя (При обнаружении неисправности выходной сигнал устанавливается в состояние сигнала тревоги $I_{вых} \leq 3{,}77$ мА.); в) линеаризацию чувствительности первичного термопреобразователя; г) автокомпенсацию изменения термо-э.д.с. от изменения температуры холодного спая.

Более широкие интеллектуальные возможности предоставляет цифровой выходной сигнал: а) более подробную диагностическую информацию о состоянии датчика или электронного модуля; б) информацию о датчике в целом (типе, серийном номере, максимальном, минимальном и фактическом диапазоне измерений температуры); в) дистанционное управление датчиком; г) информацию о несанкционированном доступе. Для работы датчиков требуется электропитание постоянного тока напряжением 18…42 В. Мощность, потребляемая интеллектуальным датчиком менее 0,9 Вт.

Погрешности измерения температуры определяются чувствительным элементом, то есть свойствами термосопротивления или термопары. Здесь существенного выигрыша интеллектуальные датчики по сравнению с датчиками ранних поколений не имеют. Для датчиков с термопарами в диапазоне температур 0…1000 °С погрешности составляют ± 0,5 °С или ± 0,25% от диапазона измерений (из двух значений выбирается большее, т. е. 0,25% от 1000 °С получается ± 2,5 °С). Для датчиков с термометрами сопротивления в диапазоне температур 0…500 °С ± 0,3 °С или ± 0,15% от диапазона измерений.

Внедрение высоких технологий при изготовлении термоэлектрических преобразователей позволило развернуть производство термопарных кабелей [28]. Термопарный кабель представляет собой гибкую металлическую трубку с размещенными внутри нее одной или двумя парами термоэлектродов. Пространство вокруг термоэлектродов заполнено уплотненной минеральной изоляцией. Термоэлектроды термопарного кабеля со стороны рабочего торца соединяются между собой лазерной сваркой, образуя рабочий спай, который заглушен приверенной стальной пробкой. Термопарный кабель выпускается за рубежом (марка Pyrotenax) и в России (марки КТМС и КТМСп).

Использование термопарного кабеля для производства термопреобразователей позволило повысить следующие потребительские качества по сравнению с термопарами традиционного исполнения: а) повышены в 2…3 раза термоэлектрическая стабильность и рабочий ресурс при сравнимых рабочих условиях; б) появилась возможность изгибать, укладывать в труднодоступные места, приваривать, припаивать или просто прижимать датчик к поверхности для измерения температуры; в) уменьшился показатель тепловой инерции, позволяющий применять термопары при регистрации быстропротекающих процессов; г) блочно-модульное исполнение термопреобразователей в защитных чехлах обеспечивает дополнительную защиту электродов от воздействия рабочей среды и оперативную замену чувствительного элемента без разрегметизации объема среды, температура которой измеряется датчиком.

Сравнительные испытания термопар нового типа показали, что дрейф термо-эдс кабельной термопары хромель-алюмель (КТХА) при температуре 800^0С за 10000 ч составляет 80…85 мкВ, тогда как у обычной термопары с большим диаметром электродов 0,7 мм – 200 мкВ. Применение кабельных термопар ТХА(ХК)-2076 с максимальной длиной погружаемой части до 16 м позволило увеличить ресурс в 2,5 раза и уменьшить инерционность в 4,5 раза.

Отечественные термопарные кабели КТМС(ХА), КТМС(ХК), КТМСп(ХА), КТМСп(ХК) предназначены для изготовления кабельных термоэлектрических преобразователей, которые используются для измерения температур от - 50^0С до + 800^0С с жилами из сплавов хромель-Т-копель и от - 50^0С до + 1000^0С с жилами из сплавов хромель-Т-алюмель. Кабель состоит из термоэлектродных жил, заключенных в оболочку из нержавеющей стали марок 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т или сплава марки ХН78Т. Термоэлектродные жилы расположены параллельно и изолированы от оболочки и друг от друга минеральной изоляцией – периклазом (порошкообразной окисью магния).

Средний срок службы термопарных датчиков 5 лет, датчиков с термометрами сопротивления – 8 лет. Типовой гарантийный срок эксплуатации 18 месяцев с момента ввода в эксплуатацию.

6.3. Диоды и транзисторы в качестве датчиков температуры

В диапазоне температур $-50...+150^{o}C$ все шире применяются датчики температур на основе прямосмещенных *p-n*-переходов в кремнии [24]. В указанном диапазоне температур датчики отличаются очень высокой стабильностью. Датчиком температуры выступает кремниевый диод или транзистор, включенный по схеме диода, когда коллектор замкнут на базу. Датчики запитываются от источника тока I, а выходным сигналом является напряжение $U_{вых}$ (рис. 6.5):

а) б)

Рис. 6.5. Схемы включения диода а) и транзистора б) для измерения температуры

Чувствительность диода или транзистора, включенного по схеме диода, к температуре имеет порядок S = - 2,5 мВ/К. Это больше чем у металлических термопар. Однако в отличие от таких стандартных термопар, как платина-платинородиевый, ХА и ХК, эта чувствительность зависит от обратного тока диода или транзистора I_o. Поэтому взаимозаменяемость обеспечивается лишь посредством отбора экземпляра диодов или транзисторов. Кроме того, чувствительность S зависит от температуры, то есть имеет место нелинейность. Однако эта нелинейность одного порядка с нелинейностью платинового термометра сопротивления того же диапазона температур, то есть ≈ 0,5° С и существенно меньше, чем у медь-константановой термопары (≈ 0,5° С), часто применяемой в диапазоне температур – 50…+150° С. Вторым преимуществом прямосмещенного *p-n*-перехода перед термопарами наряду с высокой чувствительностью, является зависимость выходного напряжения только от температуры самого перехода, тогда как э.д.с. термопар зависит от разности температур.

Значительное улучшение линейности и взаимозаменяемости достигается посредством использования спаренных транзисторов, включенных по схеме диода. Достоинством спаренных диодов, выполненных по современным планарным технологиям на одном кристалле является идентичность их обратных токов $I_0(VT1) = I_0(VT2) = I_0$ и температурных зависимостей этих обратных токов. Электрическая схема включения спаренных транзисторов для измерения температуры представлена на рис. 6.6.

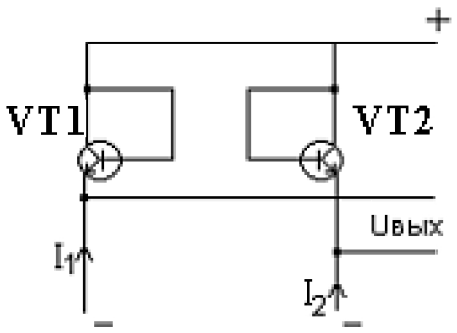


Рис. 6.6. Схема включения спаренных транзисторов для измерения температуры

Спаренные транзисторы запитываются разными, но стабилизированными токами I_1 и I_2, а выходным сигналом является разность потенциалов их эмиттеров. Связь между токами через прямосмещенные переходы и напряжениями на них при $(I_1, I_2) >> I_0$ задается выражениями:

$$\left\{\begin{array}{l} I_1 = I_0 \exp\left(\dfrac{eU_1}{kT}\right) \\ I_2 = I_0 \exp\left(\dfrac{eU_2}{kT}\right) \end{array}\right\} \qquad (6.6)$$

где e = 1,602·10^{-19} Кл - заряд электрона, k = 1,381·10^{-23} Дж/К - постоянная Больцмана, T – температура переходов, а U_1 и U_2 - напряжения на переходах.

Из (6.6) имеем:

$$U_1 = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right), \qquad U_2 = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{I_2}{I_0}\right) \qquad (6.7)$$

$$U_{вых} = U_2 - U_1 = \frac{kT}{e}\left(\ln\frac{I_2}{I_0} - \ln\frac{I_1}{I_0}\right) = \frac{kT}{e}\ln\frac{I_2}{I_1}\ , \qquad (6.8)$$

$$S = \frac{dU_{вых}}{dT} = \frac{k}{e}\ln\frac{I_2}{I_1}\ . \qquad (6.9)$$

Выражения (6.9) и (6.10) как раз и показывают прямую пропорциональную зависимость между $U_{вых}$ и T и независимость чувствительности от I_o. Важна лишь одинаковость обратных токов транзисторов. Причем:

$$\frac{k}{e} = \frac{1{,}381\cdot10^{-23}\ Дж/К}{1{,}602\cdot10^{-19}\ Кл} = 0{,}8620\cdot10^{-4}\frac{В}{К} = 86{,}20\frac{мкВ}{К}\ . \qquad (6.10)$$

Если выбрать токи $I_2 = 2{,}71828\cdot I_1$, то S = 86,2 (мкВ/К) как у наиболее чувствительной из стандартных ХК-термопары, но при $I_2 = 2\cdot2{,}71828\cdot I_1$ уже получается более чем двукратный выигрыш по чувствительности при существенно более высокой линейности. Кроме того, сохраняется преимущество в зависимости $U_{вых}$ лишь от температуры p-n-перехода.

В качестве датчика температуры можно использовать, например, спаренный транзистор КТ118, у которого $I_o \le 1$ мкА, выбрав I_1 = 1 мА и I_2 = 2…10 мА. Подключив спаренный транзистор к операционному усилителю с регулируемым коэффициентом усиления можно получить термопреобразователь с очень хорошей линейностью и либо стандартным (для подключения к системе автоматического регулирования температуры выходным сигналом 0…5 мА или 4…20 мА), либо с чувствительностью 10 мВ/К (последнее удобно при подключении к цифровому вольтметру для прямого отсчета температуры в градусах). Подобные датчики находят применение и для адаптивной компенсации изменения температуры свободных спаев термопар в составе интеллектуальных термопреобразователей.

6.4. Особенности измерения температуры в жидкостях и газах

Измерения температуры в жидкостях и газах – основных хладагентов в системах охлаждения лазеров - имеют свои особенности. Теплообмен между датчиком и средой сильно зависит от параметров, характеризующих свойства

среды – вязкости, теплопроводности и скорости. Кроме того, трубопровод, по которому течет поток, обычно имеет температуру, отличную от температуры окружающей среды. В связи с возникающими при этом радиальными градиентами температуры встает задача о наилучшем расположении зонда в потоке. В ряде случаев радиационный теплообмен между датчиком и стенкой трубопровода может приводить к существенному изменению равновесной температуры датчика. При больших скоростях течения в жидкостях происходит нагрев датчика вследствие трения, а в газах – вследствие адиабатического сжатия газа перед препятствием, которое представляет собой зонд. Таким образом, грамотное применение датчика предусматривает оценку вкладов этих явлений, т.к. универсальных средств их нейтрализации не существует, но возможны некоторые рекомендации, выработанные практикой применения датчиков температуры.

Поскольку температура стенок трубопровода отличается от температуры потока, в поперечном направлении устанавливается градиент температуры. В частности, температура в центре трубопровода отличается от средней температуры потока. Если распределение температуры в поперечном направлении поддается расчету, то расчетным путем можно определить и положение точки, в которой температура равна средней, и именно в ней следует установить зонд. Можно разместить несколько зондов в разных точках поперечного сечения трубопровода и усреднить их показания (рис. 6.7).

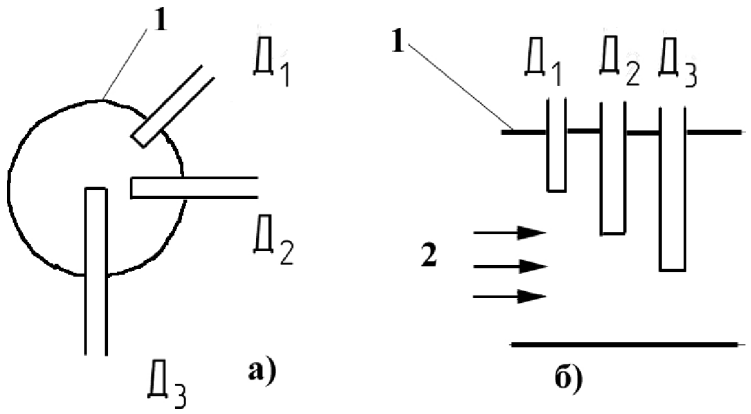


Рис. 6.7. Расположение трех датчиков температуры в трубопроводе: а – вид по оси трубопровода; б – разрез трубопровода с установленными датчиками температуры: $Д_1$, $Д_2$, $Д_3$ – датчики температуры; 1 - стенка трубопровода; 2 - направление потока хладагента

Наконец, если распределение температур неизвестно и по техническом условиям размещение нескольких зондов невозможно, то наиболее представительное значение температуры дает датчик, размещенный на половине внутреннего радиуса трубопровода (рис. 6.8). Здесь следует заметить, что для системы автоматического регулирования температуры важна лишь стационарность распределения температуры вблизи датчика.

Радиационный теплообмен между стенками трубопровода и корпусом датчика наиболее вероятен при измерении температур в газовых потоках, т.к. жидкости, как правило, хорошо поглощают тепловое излучение. Однако радиационный поток может оказывать существенное влияние на показания датчика, расположенного вблизи газоразрядной камеры в случае попадания прямого излучения плазмы разряда на датчик.

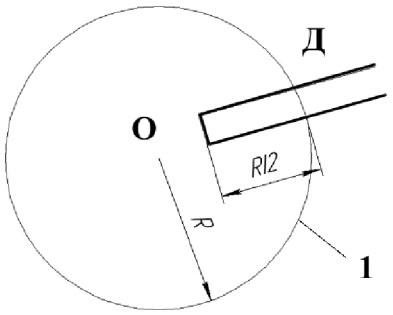


Рис. 6.8. Оптимальное расположение датчика температуры в трубопроводе:
О – центр трубопровода; Д – датчик температуры; 1 - стенка трубопровода

Снижают влияние радиационного теплообмена следующие технические решения: а) высокоотражающие покрытия внутренних стенок трубопровода в зоне расположения датчика и наружной поверхности корпуса самого датчика; б) защитные отражающие экраны (рис. 6.9).

Влияние вязкости (жидкости) и адиабатического сжатия (газа) на показания датчика температуры учитываются на основании применения законов течения и обтекания тел жидкостями и газами, т.е. используются различные критериальные зависимости.

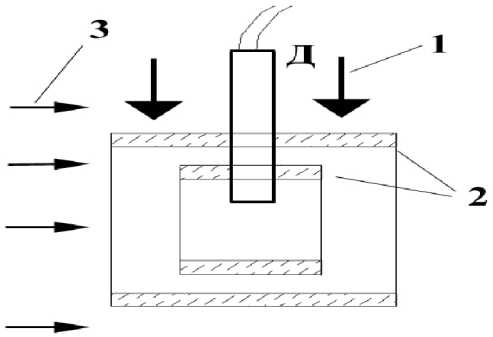


Рис. 6.9. Защита датчика температуры от радиационных потоков высокоотражающими экранами: Д – датчик температуры; 1 - поток излучения; 2 - высокоотражающие экраны; 3 - поток хладагента

Резюмируя все вышеизложенное можно сделать вывод о том, что для получения достоверной информации об измеряемой физической величине, необходимо не только осуществить выбор датчика и регистрирующего прибора, но и произвести подробный анализ условий его работы, чтобы избежать возникновения погрешностей представительности.

Иногда достоверные сведения о температуре хладагента можно получить измеряя температуру наружной поверхности стенки трубопровода, на которой тогда и закрепляется датчик. Крепление датчика на стенке трубопровода тем более оправдано, если важно лишь поддерживать стабильное значение температуры хладагента, а систематическая погрешность измерения температуры в несколько градусов не сказывается существенным образом на параметрах системы. Особенно удобными в этом случае оказываются термопары, т.к. для надежного теплового контакта спай термопары допускает сварку со стенкой трубопровода (рис. 6.10).

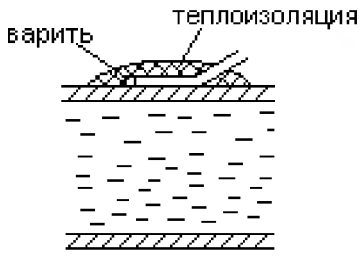


Рис. 6.10. Крепление термопары на трубопроводе сваркой

6.5. Градуировка датчиков температуры

Вопросы градуировки датчиков температур на диапазон 200…600 К в практике заводских лабораторий обычно решаются путем использования термостата и образцовых термометров или образцовых датчиков с прецизионными измерителями их выходных сигналов. В зависимости от требуемой производительности градуировки в термостат помещаются один или несколько градуируемых датчиков совместно с образцовым. Затем температуру термостата изменяют с требуемым шагом и временными выдержками на каждом шаге. Продолжительность выдержки на каждом шаге зависит от инерционности процессов термостабилизации и выравнивания температур в рабочем объеме термостата.

Представление о параметрах современных термостатов для градуировки датчиков температуры – калибраторов температуры - можно получить из описания калибратора температуры КТ-500, разработанного научно-производственным предприятием «Элемер» - дочерней фирмы ВНИИФТРИ Госстандарта России [29]. Он предназначен для воспроизведения температур в диапазоне от 50 до 500^{o} С и используется при поверке и калибровке термопреобразователей сопротивления, термоэлектрических преобразователей, термопреобразователей с унифицированным выходным сигналом, а также термопреобразователей с индивидуальными статическими характеристиками преобразования.

КТ-500 с прецизионным регулятором температуры имеет цельнометаллический термостатирующий блок диаметром 90 мм с отверстиями, в которых размещаются поверяемые термопреобразователи. Температура термостатирования устанавливается оператором с помощью клавиатуры на панели управления или по интерфейсу RS232 с компьютера. Наличие двух охранных блоков и монолитная конструкция термостатирующего блока обеспечивают высокую точность воспроизведения температуры и стабильность ее поддержания.

Технические характеристики КТ-500. Параметры электропитания: 220 В, 50 Гц. Потребляемая мощность в режиме нагрева не более 2,5 кВт, а в режиме поддержания ≤ 1 кВт. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности воспроизведения температур ± (0,05 + 0,0006·t) °С, где t – значение воспроизводимой температуры. Нестабильность поддержания температуры за 30 минут ± (0,01 + 0,0002·t) °С. Неоднородность температурного поля по высоте в рабочей зоне от 0 до 40 мм ± (0,02 + 0,0004·t) °С. Максимальная разность воспроизводимых температур в каналах с одинаковыми диаметрами ± (0,01 + 0,0003·t) °С. Единица последнего разряда индикатора температуры 0,01 °С. Максимальная скорость нагрева - 12 °С/мин. Максимальная скорость охлаждения при 100 °С - 1,5 °С/мин, при 400 °С - 8 °С/мин. Время выхода на рабочий режим 80 мин. Глубина каналов в термостатирующем блоке 190 мм. Диаметры каналов ∅ 4,5 мм – 2 шт., ∅ 5,5 мм – 1 шт., ∅ 6,5 мм – 3 шт., ∅ 8,5 мм – 2 шт., ∅10.5 мм – 3 шт. Габаритные размеры - 320 х 180 х 370 мм. Масса – 17 кг. Температура окружающего воздуха 10…35 °С. Влажность при 30 °С не более 75%. Средняя наработка на отказ не менее 10000 часов. Средний срок службы не менее 5 лет. Межповерочный интервал – 1 год. Гарантийный срок – 12 месяцев со дня ввода в эксплуатацию.

Результатом градуировки является зависимость выходного электрического сигнала градуируемого датчика от температуры как в режиме ее подъема, так и спуска. С помощью этой зависимости по величине выходного сигнала измеряют температуру датчика, а при грамотном его выборе и правильной установке, и объекта – хладагента или активного вещества лазера.

Градуировочная характеристика датчика позволяет оценивать диапазон измеряемых температур и погрешность их измерения, находить аппроксимирующую кривую или отклонения от линейности, если таковая для датчика постулируется, наличие гистерезиса выходного сигнала, выходящего за границы погрешности измерений. Естественно, что совокупность этих данных необходима при проектировании автоматической системы регулирования или стабилизации температуры, очувствленной этим датчиком.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите способы охлаждения лазеров и приведите примеры серийных лазерных установок, в которых они нашли применение.

2. Каковы температурные диапазоны активных сред лазеров различных типов?

3. Охарактеризуйте преимущества и недостатки используемых способов охлаждения лазерных установок.

4. Расставьте приоритеты при выборе способа охлаждения лазера.

5. В чем состоит опасность появления газовых пузырьков в жидкостной системе охлаждения лазера?

6. Опишите рациональные приемы заполнения хладагентом жидкостной системы охлаждения лазера.

7. Как производится дегазация хладагента жидкостной системы охлаждения?

8. В каких случаях следует использовать контактное охлаждение?

9. В чем состоит преимущество гибридных систем охлаждения?

10. Какие термины используются для классификации систем охлаждения лазеров? Раскройте содержание этих терминов.

11. Какие вещества наиболее часто употребляются в качестве хладагентов в системах охлаждения лазеров?

12. Приведите примеры конструкционных материалов перспективных для использования в системах охлаждения лазеров.

13. Назовите совокупность параметров, которые следует учитывать при выборе хладагента.

14. Опишите методику выбора элемента Пелтье.

15. В чем состоит методика оценки параметров нагнетательного элемента?

16. Каковы основные способы охлаждения, используемые в источниках питания?

17. Чем определяется выбор способа охлаждения источника питания?

18. В чем преимущества испарительного способа охлаждения?

19. Какими параметрами источника питания оперируют при выборе способа охлаждения на этапе проектирования?

20. Каков диапазон рабочих температур большинства электронных элементов источников питания?

21. Назовите основные конструктивные решения современных вентиляторов для принудительного конвективного отвода тепла от электронных блоков.

22. По каким параметрам оценивается пригодность вентилятора для принудительного конвективного теплоотвода?

23. В чем состоит методика выбора вентилятора для принудительного конвективного теплоотвода?

24. Какого назначение датчиков температуры в системах охлаждения лазеров?

25. Какими параметрами описываются свойства датчиков температуры?

26. Назовите типы датчиков температуры для систем охлаждения лазеров и физические принципы их работы.

27. В чем состоят преимущества термопарных кабелей по сравнению с термопарами традиционного исполнения?

28. Какие факторы следует учитывать при измерении температуры в потоках жидкости и газа?

29. Перечислите основные технические решения, обеспечивающие достоверность измеренных значений температур в потоках хладагентов и активных сред.

30. Что представляет собой методика градуировки датчиков температуры?

31. Какие приборы и устройства используются для градуировки датчиков температуры?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в учебном пособии сведения и приемы могут быть использованы для обучения проектированию эффективных и экономичных систем охлаждения лазерных установок высокого и среднего уровней мощности различного назначения. Существующие методы расчета позволяют определить тепловой режим лазера и его составных частей как для уже разработанных конструкций, т.е. решать задачи анализа, так и для вновь проектируемых. Как правило, многокритериальные технические задачи, к которым относится синтез системы охлаждения, не имеют однозначно оптимального решения. Поэтому более близким к оптимальному вариант системы охлаждения получается в результате сравнительных исследований нескольких альтернатив. Настоящее учебное пособие, как надеются авторы, и должно снабдить будущих инженеров-проектировщиков каким-то минимальным набором технических решений. По сути те же цели преследовались и при формировании примеров элементной базы систем охлаждения.

Набор факторов, которые определяют облик проектируемой системы охлаждения и позволяют уже на ранних стадиях проектирования отсечь заведомо не оптимальные альтернативы, представляется следующим:

1. Уровень температуры лазерной среды и плотность отводимого теплового потока;

2. Состояние среды, куда отводится теплота;

3. Допустимые массогабаритные параметры системы охлаждения. Здесь важно рассчитать такой теплообменник, который при минимальных потерях полного давления обеспечит максимальный съём тепла с единицы площади теплообмена;

4. Целесообразность применения холодильных машин и выполнения системы охлаждения в моноблочном или многоблочном вариантах, в котором элементы могут встраиваться по отдельности в контур лазера;

5. Необходимость встроенных систем контроля и автоматического регулирования;

6. Решение вопросов безопасной эксплуатации.

На основе этой информации производится выбор прототипа системы охлаждения лазера и его источника питания. Расчетно-экспериментальным путем прототип дорабатывается, его параметры конкретизируются, после чего он включается в состав лазерного комплекса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алейников В. С, Масычев В. И., Сысоев В. К. Лазеры на окиси углерода. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.

2. Технологические лазеры: Справочник: В 2 т. - Т.1: Расчет, проектирование и эксплуатация/Под общ. ред. Г.А.Абильсиитова. - М.: Машиностроение, 1991.- 432 с.

3. Белостоцкий Б.Р., Любавский Ю.В., Овчинников В.М. Основы лазерной техники. Твердотельные ОКГ. – М.: «Сов. радио», 1972. – 408 с.

4. Гришанов В.Н., Изжеуров Е.А., Меженин А.В. Принцип действия, конструкция и режимы работы импульсного лазерного дальномера ДАК-2М-1: Метод. указания. – Самара: СГАУ, 2003. – 60 с.

5. Гришанов В.Н., Изжеуров Е.А. Конструкция и параметры автоматизированного лазерного раскроечного комплекса «Бистар 3015». Метод. указания. – Самара: СГАУ, 2003. – 46 с.

6. Белостоцкий Б.Р. Системы охлаждения оптических квантовых генераторов. – Л.: ЛДНТП, 1971. – 68 с.

7. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. – М.: «Машиностроение», 1969. – 265 с.

8. Глотов Е.П., Данилычев В.А., Сорока А.М. Электроионизационный CO лазер с инжекцией лазерной смеси в жидкой фазе // Краткие сообщения по физике. – 1985. – № 12. – С. 30–31.

9. Евдулов О.Е., Исмаилов Т.А. Системы термостабилизации радиоэлектронной аппаратуры на основе совместного использования рабочих веществ со стабильной температурой плавления и термоэлектрического метода охлаждения. // Изв. Вузов. Приборостроение. – 2004. - № 7. – С. 16 – 20.

10. Довгялло А.И., Угланов Д.А. Энергетический баланс технологического комплекса CO_2-лазера - холодильная машина. // Сб. тр. науч-техн. конф. «Лазерные системы и их применение». – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2004. – С. 96–98.

11. Зеликовский И.Х, Каплан Л.Г. Малые холодильные установки: Справочник. – М.: Агропромиздат, 1989. – 452 с.

12. Сайт, посвященный холодильному оборудованию. – http://www.holod.median.ru

13. Сергель О.С. Прикладная гидрогазодинамика. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.

14. Теплов А.В. Основы гидравлики. – М.: Энергия, 1965.- 315 с.

15. Толстоногов А.П. Системы охлаждения поршневых двигателей внутреннего сгорания: Учеб. пособие. – Самара: СГАУ, 2002. – 208с.

16. Зангер Г. Электронные системы. Теория и применение. - М.: Мир, 1980. - 392 с.

17. Эраносян С.А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 176 с.

18. Костиков В.Г., Никитин И.Е. Источники питания высокого напряжения РЭА. – М.: Радио и связь, 1986. – 200 с.

19. Самойлов А.Г., Самойлов С.А., Полушин П.А. Мощные транзисторные генераторы высокой частоты. // ПТЭ. – 1996. - № 6. – С. 53–56.

20.Костиков В.Г., Парфенов Е.М., Шахнов В.А. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 344 с.

21.Полищук А. Обеспечение теплового режима мощных светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств // Современная электроника. – 2006. – № 3. – С. 52 – 56.

22.Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупрводниковые приборы: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.

23.Вихарев Л. Вентиляторы для радиоэлектронной аппаратуры // Современная электроника. – 2006. - № 5. – С. 48–54.

24. Аш Ж. и соавторы. Датчики измерительных систем: В 2 кн.. Кн. 1. – М.: Мир, 1992. – 480 с.

25. Измерения в промышленности. Справ. изд. В 3 кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура / Под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990. – 384 с.

26. Приборы для измерения температуры контактным способом / Под ред. Р.В. Бычковского. – Львов: Вища школа, 1979. – 208 с.

27. Ядевич А. Платиновые тонкопленочные датчики температуры фирмы Heraeus Sensor Technology // Современная электроника. – 2006. – № 6. – С. 36–39.

28. Бартенев В., Бартенев М. Аналоговые датчики температуры, влажности и давления // Современная электроника. – 2006. – № 6. – С. 26–31.

29.Каталог средств и систем технологического контроля НПП «Элемер». – http://www.elemer.ru.

Учебное издание

Гришанов Владимир Николаевич,
Изжеуров Евгений Александрович,
Угланов Дмитрий Александрович

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ

Учебное пособие

Редакторская обработка *О.Ю. Дьяченко, Т.К. Кретинина*
Корректорская обработка *Н.С. Куприянова*
Доверстка *А.А. Гнутова, А.В. Ярославцева*

Подписано в печать 29.11.2006. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 8,14. Усл. кр.-отт. 8,26. Печ. л. 8,75.
Тираж 50 экз. Заказ . ИП-71/2006.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

В.Н. ГРИШАНОВ, Е.А. ИЗЖЕУРОВ,
Д.А. УГЛАНОВ

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ

2006

САМАРА