

А. П. Меркулов, Н. Д. Колышев

МЕТОДИКА АТТЕСТАЦИИ ИНДИКАТОРОВ ВЛАЖНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ СТЕНДА

ВЫБОР МЕТОДА АТТЕСТАЦИИ ИНДИКАТОРОВ ВЛАЖНОСТИ

При разработке новых приборов для измерения низких значений влажности особую роль приобретает методика их испытаний. Обычный способ сравнения исследуемого прибора с контрольным оказывается неприменимым из-за отсутствия контрольных гигрометров. Поэтому в последнее время усиленно начали разрабатывать и применять установки с косвенным контролем влажности; эти способы находят все более широкое распространение и в ряде случаев становятся основными при испытаниях и градуировке гигрометров.

Выбор образцового метода имеет большое значение, т. к. оценка погрешностей исследуемого гигрометра непосредственно зависит от точности образцового прибора.

Наиболее точным принято считать прямой (абсолютный) метод полного поглощения, основанный на пропускании определенного объема газа через вещество, способное поглощать водяной пар, и на оценке изменения параметров этого вещества в результате полного поглощения влаги. Известны две разновидности метода: весовая и химическая. В первой влагосодержание воздуха определяют по приросту в весе поглотителя. Химические методы основаны на химической реакции поглотителя с влагой исследуемого газа. К наиболее известным относится метод титрования реактивом Фишера, при котором анализируемый газ поступает в реакционный сосуд, где барботируется через реактив до окончания титрования, фиксируемого электрометрическим или иным способом. Влагосодержание газа определяют по объему прошедшего газа и по количеству реактива в сосуде.

Методы полного поглощения можно рассматривать как абсолютные; их точность в принципе может быть очень высока. Однако эти методы длительны, трудоемки и не свободны от методических погрешностей. Наличие в исследуемом газе примесей, удерживаемых поглотителем, а также загрязнение внешней поверхности сосудов увеличивают погрешность измерения; погрешности возникают также при неполном поглощении влаги. Значение указанных погрешностей возрастает с уменьшением величины измеряемой влажности.

Остальные известные методы получения газа с определенной влажностью уступают методу полного поглощения по точности и надежности получаемых результатов.

Ввиду этого сохраняется необходимость изыскания и создания более удобного и быстрого и в то же время достаточно точного образцового метода для аттестации гигрометров.

В настоящей работе рассматривается метод аттестации индикаторов точки росы газов при отрицательных температурах, включающий два этапа проверки.

На первом этапе контрольный газ с температурой точки росы заведомо более высокой, чем заданная (T), пропускается над развитой поверхностью, охлажденной до температуры T , которая поддерживается с необходимой точностью в течение нужного времени. При соблюдении ряда условий, о которых будет сказано ниже, влага из газа вымораживается с достаточной полнотой и газ приобретает температуру точки росы (t_p) близкую к T , но всегда сохраняется условие $t_p > T$.

Контрольный газ (вымороженный) подается в индикаторы влажности, показания которых сравниваются с T .

На втором этапе испытаний контрольный газ с температурой точки росы заведомо более низкой, чем заданная, пропускается над той же поверхностью с температурой T , но покрытой слоем льда и инея. При этом газ насыщается влагой и приобретает температуру точки росы (t_p) близкую к T , но всегда сохраняется условие $t_p < T$, т. к. практически полное насыщение осуществить трудно (как и полное вымораживание).

Контрольный газ (насыщенный) подается в индикатор влажности, показания которого сравниваются с T .

Таким образом, зная истинное значение температуры T и показание индикатора влажности на двух этапах, можно определить:

1) достоверность показаний индикаторов влажности в диапазоне

$$t_p'' < T < t_p';$$

2) относительную погрешность показаний.

$$\Delta' = \frac{t_p' - T}{T} \cdot 100\% \text{ и } \Delta'' = \frac{T - t_p''}{T} \cdot 100\%;$$

$$\Delta = \frac{\Delta' + \Delta''}{2} \%.$$

Предлагаемый метод может быть реализован в простой, надежной и малоинерционной установке, позволяющей за относительно короткое время осуществить цикл контрольных измерений; при этом переход с одного температурного режима на другой осуществляется достаточно просто и быстро.

Единственным задающим и контролируемым параметром в такой установке является температурное поле поверхности (его величина и равномерность), которое можно определить с достаточно высокой степенью точности.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ ВЛАГИ

Выделение пара вымораживанием широко используется при анализе газов, а также в самых разнообразных лабораторных исследованиях. В последнем случае выделение пара вымораживанием обычно осуществляют в трубе-ловушке, помещенной в охлаждаемую среду. При пропускании через ловушку газовой смеси содержащей пар, происходит конденсация его на стенках ловушки. Предполагается, что содержание пара в газовой смеси после ловушки соответствует состоянию насыщения при температуре поверхности ловушки.

Процесс вымораживания влаги из газа, находящегося в контакте с охлажденной поверхностью, осложняется возможностью образования тумана — дисперсной системы, состоящей из капель жидкости, взвешенных в газе. Образование тумана возможно даже при низких отрицательных температурах, т. к. мелкие капли жидкости способны к переохлаждению (например, капли воды переохлаждаются до -40°C).

При конденсации пара на поверхности практически всегда образуется пересыщенный пар, часть которого может конденсироваться в объеме и уноситься газовым потоком из ловушки в виде аэрозоля [4]. Естественно, что в этом случае содержание влаги в газовой смеси после ловушки будет выше, чем это соответствует давлению насыщенного пара, и будет равно сумме весовых концентраций аэрозоля и пара.

Количество образующегося тумана возрастает с увеличением разности температур поверхности ловушки и поступающей в нее газовой смеси, а также с увеличением запыленности смеси [4].

Следовательно, в установке, предназначенной для полного вымораживания влаги из газа до уровня заданной температуры, должны быть приняты условия, предотвращающие возникновение тумана.

Если давление пара в газовой фазе больше давления насыщенного пара, его называют пересыщенным, а степень пересыщения выражается уравнением:

$$S = \frac{P}{P_{\infty}(T)}$$

где S — пересыщение пара;

P — давление пара в газовой смеси;

$P_{\infty}(T)$ — давление насыщенного пара над плоской поверхностью той же жидкости при температуре T .

Конденсация пара в объеме начинается при определенном пересыщении, называемом критическим пересыщением $S_{кр}$.

Процесс перехода пара в туман происходит скачкообразно, наступая при критических условиях, когда $S \geq S_{кр}$. Отсюда следует, что для того, чтобы установить возможность образования тумана и разработать мероприятия, предупреждающие его возникновение, необходимо знать величину критического пересыщения пара и величину возникающего пересыщения.

При охлаждении парогазовой смеси, турбулентно движущейся вдоль более холодной поверхности, происходит молекулярная диффузия пара к этой поверхности через прилегающий к ней пограничный слой газа, а затем конденсация пара на поверхности; одновременно парогазовая смесь охлаждается за счет молекулярной теплопроводности.

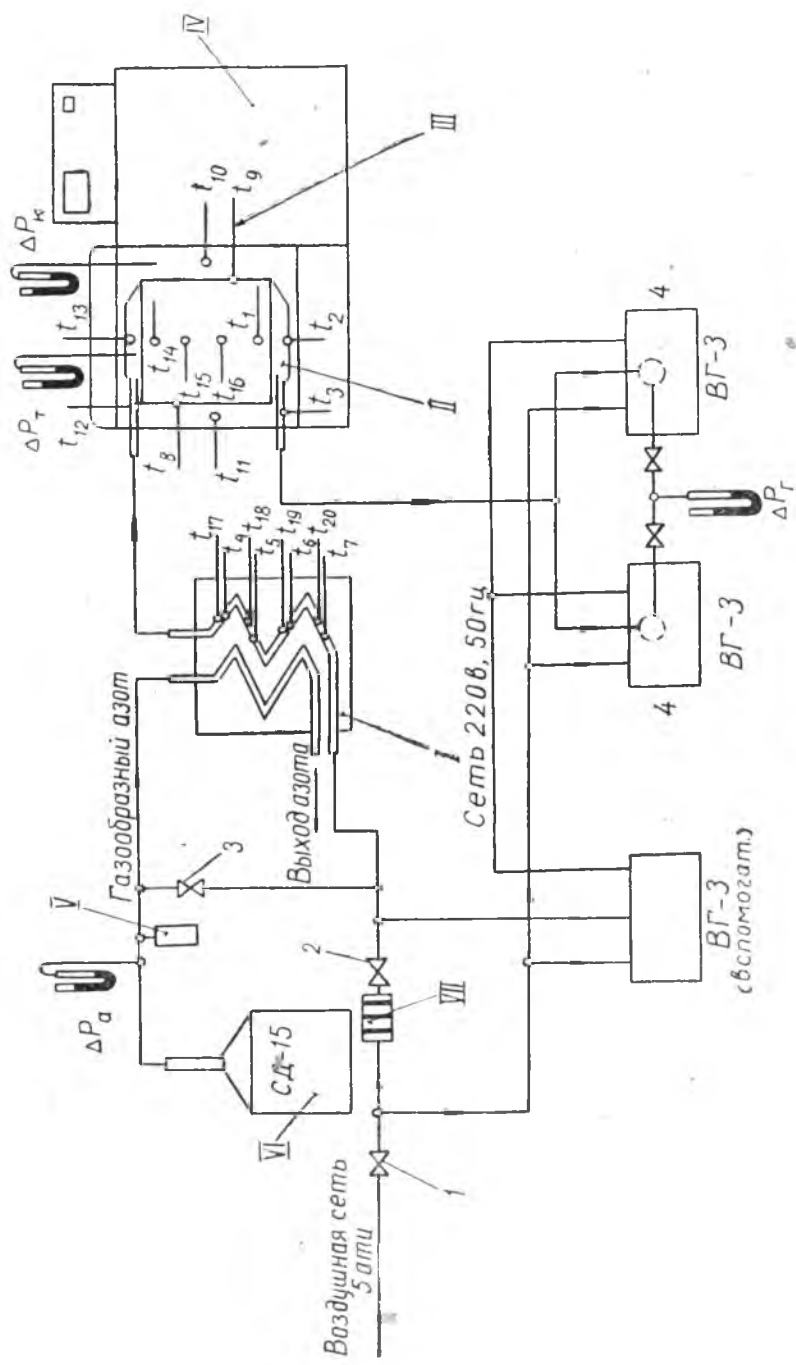
Имеются полученные теоретическим путем уравнения, связывающие величины S , P и T в общем виде [4], однако процесс конденсации пара на поверхности осложнен многими другими одновременно идущими процессами, поэтому расчеты требуют знания ряда поправочных коэффициентов, получаемых экспериментальным путем.

Так как с повышением температуры поверхности ловушки максимальное пересыщение пара уменьшается, то, исходя из заданного содержания пара в газе на входе в ловушку, можно установить такую температуру ее поверхности, при которой максимальное пересыщение пара будет достаточно низким, чтобы не происходило образование тумана.

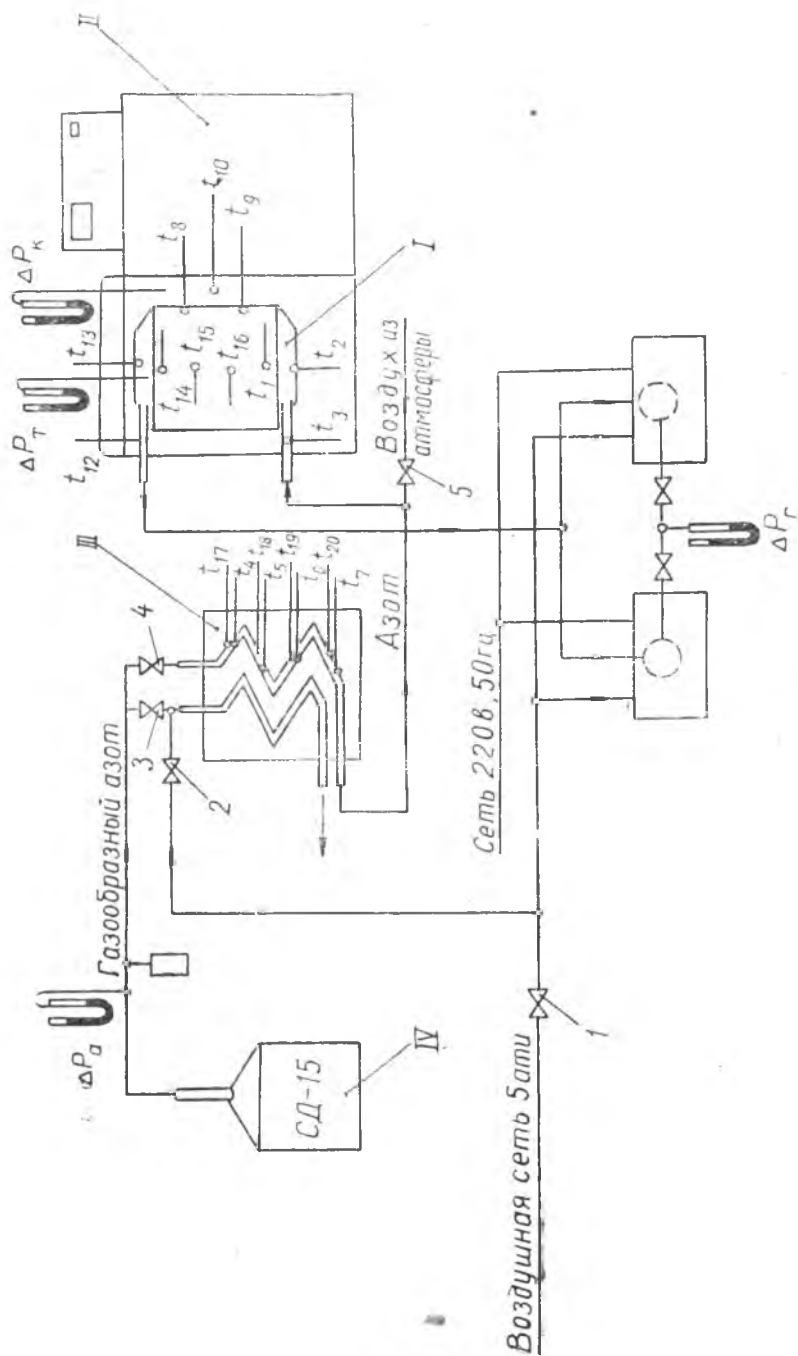
К сожалению, в литературе отсутствуют данные о критическом пересыщении пара воды при низких температурах. Некоторые опытные сведения [4] позволяют установить, что для предотвращения образования тумана разность температур поверхности ловушки и газовой смеси не должна превышать $10 \div 7^{\circ}\text{C}$ (после охлаждения газовой смеси до температуры ее точки росы). Эти сведения относятся к области температур $0 \div -80^{\circ}\text{C}$.

Возможность образования тумана может быть значительно снижена при применении насадок. При этом, чем более развита поверхность насадки, тем ниже максимальное пересыщение пара.

Таким образом, применение развитой охлажденной поверхности, с которой контактирует газ, и поддержание разности температур между газом и поверхностью не более 7°C исключает образование тумана, обеспечивает вымораживание пара с любой степенью пол-



Фиг. 1.



ноты и гарантирует получение высокой степени очистки воздуха от влаги [4].

Наибольшей полноты вымораживания следует ожидать при температурах ниже -40°C , так как при этой температуре даже переохлажденные мелкие капли воды кристаллизуются и туман становится пылью, которую можно отфильтровать.

СТЕНД ДЛЯ АТТЕСТАЦИИ ИНДИКАТОРОВ ВЛАЖНОСТИ

Схема стенда представлена на фиг. 1 и 2.

Основными его агрегатами являются: предварительный теплообменник; основной теплообменник; азотная холодильная камера; аттестуемый индикатор влажности; сосуд Дьюара СД-15 с жидким азотом; фильтр тонкой очистки; измерительная аппаратура.

Ниже приводится описание конструкции и принцип действия основных агрегатов стенда.

Предварительный теплообменник

Предварительный теплообменник исключает возможность образования тумана в процессе вымораживания влаги путем постепенного охлаждения воздуха (т. е. обеспечивает разность температур между холодной поверхностью и воздухом не более 7°C).

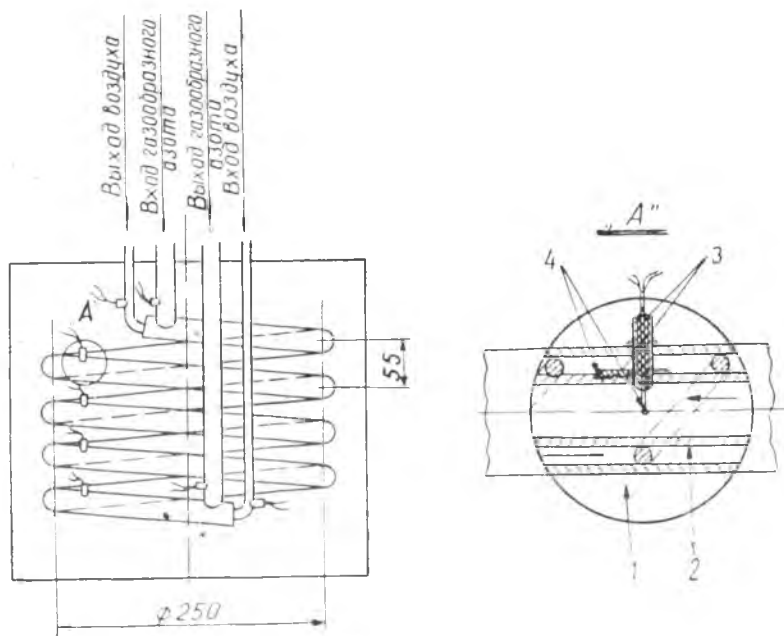
В процессе увлажнения азота предварительный теплообменник используется для подогрева азота и частичного его увлажнения перед подачей в основной теплообменник.

Предварительный теплообменник типа «труба в трубе», схема которого представлена на фиг. 3, выполнен в виде спирали диаметром 250 мм. Наружная труба латунная 14×1 мм, внутренняя — медная 8×1 мм. Трубы центрируются относительно друг друга вставленной между ними проволоочной спиралью. Теплообменник помещен в кожухе с теплоизоляционной засыпкой. Длина теплообменного тракта 3,2 м.

Для контроля температурного перепада между потоком газа во внутренней трубке и ее поверхностью используются медь-константановые термопары (диаметр проволоки 0,1 мм) в шести точках по длине тракта. Заделка термопар показана на фиг. 3.

Основной теплообменник предназначен для вымораживания влаги из газа (или насыщения газа влагой) путем контакта газа с развитой поверхностью, имеющей постоянную (заранее заданную) температуру. При этом точка росы выходящего газа соответствует температуре поверхности. В случае насыщения эта поверхность предварительно покрывается слоем льда. Схема теплообменника представлена на фиг. 4. Основой его является цилиндр диаметром 200 мм и высотой 400 мм из листовой меди ($\delta = 1$ мм) с дном и крышкой в виде усеченных конусов. Поверхность теплообменника создана за счет медных проволок диаметром 1,5 мм, про-

низывающих поверхность цилиндра, заполняющих его внутреннюю полость и выходящих своими концами наружу. Высокая теплопроводность меди позволяет получить достаточно однородное температурное поле на всей поверхности теплообменника.



Фиг. 3.

Насыщенность внутреннего пространства теплообменника большим числом проволок значительно турбулизует поток газа и увеличивает количество центров кристаллизации влаги, что интенсифицирует процесс вымораживания. Практически можно считать, что при малых расходах газа через теплообменник ($3 \div 5$ л/мин), процесс вымораживания (или насыщения) будет проходить в пограничном слое газа на поверхности проволок.

Основные данные теплообменника

1. Общее число проволок в теплообменнике

$$n_{\Sigma} = 125 \cdot 41 = 5125 \text{ шт.};$$

2. Общая поверхность теплообмена

$$F_{\Sigma} = F_{\text{пр}} + F_{\text{ц}} = 2,42 + 0,25 = 2,67 \text{ м}^2.$$

3. Скорость протекания газа через теплообменник в зависимости от расхода:

$$W = \frac{V_{\text{газа}}}{F_{\text{прох.}}},$$

где $V = 2; 3; 4; 5; 7; 10$ л/мин;

$W = 0,26; 0,4; 0,53; 0,66; 0,92; 1,31$ см/сек.

Контроль температуры по тракту теплообменника осуществляется термодарами гр. МК с диаметром проволок 0,1 мм. Схема расположения термодар представлена на фиг. 4.

Вынос из теплообменника вымороженной влаги в виде частиц льда и снега предотвращается мелкоячеистыми фильтрами в нижней части теплообменника: предварительным — из сетки с ячейкой 0,25 мм и окончательным — с ячейкой 0,03 мм.

В процессе вымораживания влаги выходящий из теплообменника газ поступает вначале в короткий, хорошо теплоизолированный патрубок, имеющий с внутренней поверхностью теплообменника одинаковую температуру, затем выходит через отводящую трубку, соединенную с патрубком текстолитовым переходником и имеющую температуру более высокую, чем поверхность теплообменника.

Таким образом, проходящий через теплообменник газ нигде не контактирует с поверхностью, имеющей более низкую температуру, чем заданная.

Азотная холодильная камера АХК-4

АХК-4 обеспечивает охлаждение поверхности основного теплообменника в диапазоне рабочих температур $0 \div (-60)^{\circ}\text{C}$. Схема ее показана на фиг. 5.

Охлаждение объектов основано на принципе поглощения тепла жидким азотом, испаряющимся в рабочем объеме камеры.

Количество испаряющегося в камере жидкого азота регулируется командным терморегулятором КТР-1, воздействующим на вентиль с электроприводом.

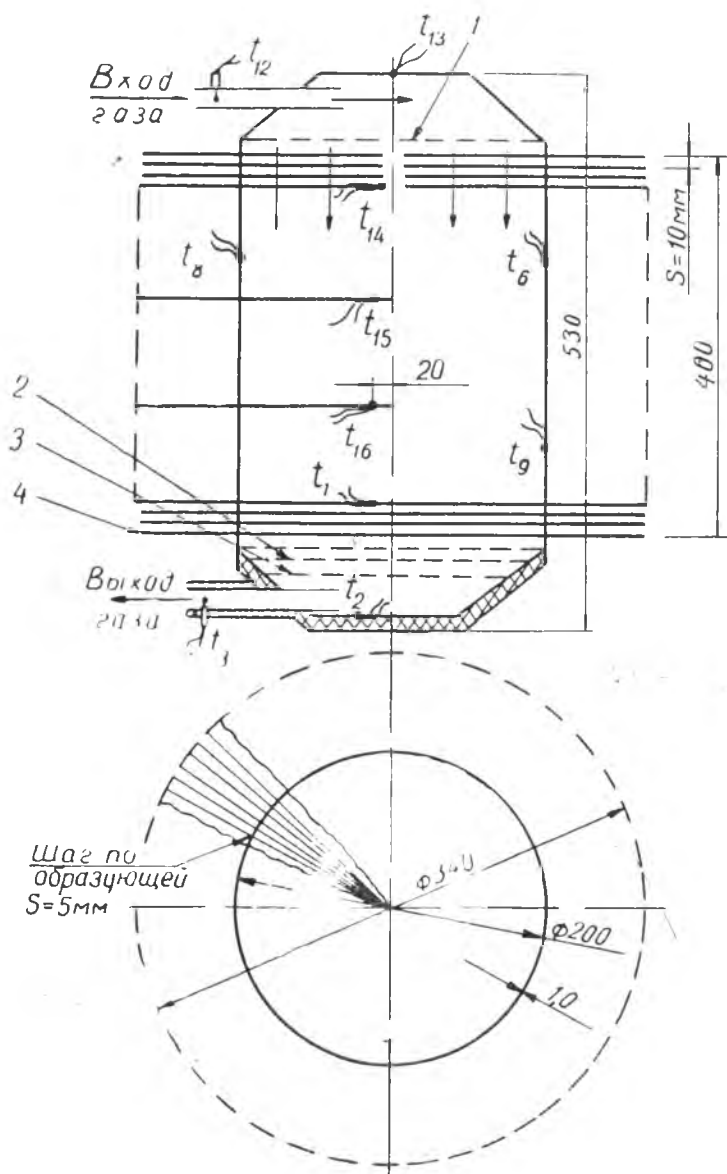
В левой половине корпуса 1 расположена рабочая камера 3 с обтекателем 4 и вентилятор 6 с электродвигателем постоянного тока 7 мощностью 75 вт.

Рабочая камера теплоизолируется слоем пенопласта толщиной в 70 мм. Теплоизоляция рабочей камеры изготавливается отдельным узлом в виде полого цилиндра с днищем, а в корпус камеры устанавливается на кронштейнах.

Между обечайкой рабочей камеры и тепловой изоляцией сделан кольцевой зазор в 25 мм для организации циркулирующего внутри камеры потока паров азота, создаваемого вентилятором.

Сверху рабочий объем закрывается откидной крышкой, теплоизолированной пробковой крошкой.

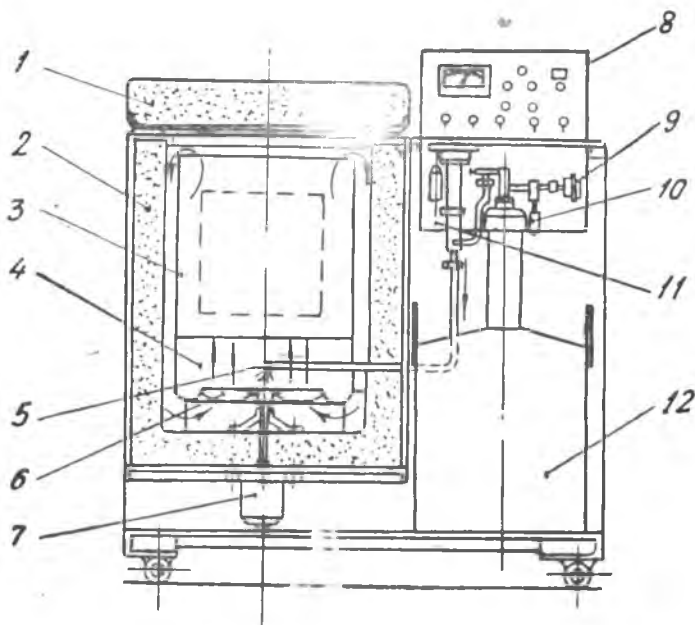
В рабочем объеме камеры, над вентилятором, расположен распылитель, к которому подводится жидкий азот из сосуда Дьюара 12, установленного в правой половине корпуса камеры.



(Все размеры даны в мм)

Фиг. 4.

В стандартный сосуд Дьюара с жидким азотом вставляется испаритель 9 с герметизирующей пробкой, испарительной трубкой, нагревателем, запорной, измерительной и предохранительной арматурой 10.



Фиг. 5.

Испаритель трубкой диаметром 6×5 соединяется с дозирующим органом жидкого азота, представляющим собой игольчатый вентиль с электроприводом, а затем с рабочим объемом камеры.

Управление дозирующим вентилем осуществляется командным терморегулятором (КТР-1) 8 в зависимости от заданной температуры.

Конечная температура в камере задается с помощью установочного лимба терморегулятора и поддерживается с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ в диапазоне температур от 0 до $(-100)^\circ\text{C}$. Измерение температуры осуществляется с помощью находящегося в рабочей камере термометра сопротивления и милливольтметра М-24.

Измерительная аппаратура

1. Измерение температур по тракту стенда.

Величина погрешности предлагаемого метода определяется, в основном, точностью измерения температур по тракту стенда, поэтому данному вопросу уделено особое внимание.

В стенде использованы медь-константановые термопары с диаметром электродных проволок 0,1 мм в тефлоновой изоляции.

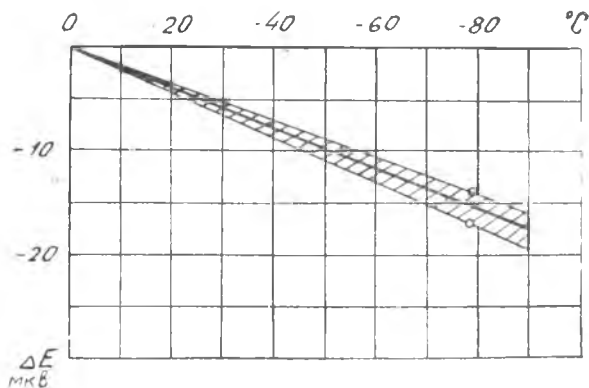
В качестве основного измерительного и контрольного прибора использовался потенциометр постоянного тока низкоомный типа ППТН-1 с зеркальным гальванометром постоянного тока типа М17/6, обеспечивающий измерение э. д. с. термопар с точностью до 0,001 мв. Это позволяет измерять температуру с точностью 0,03°C.

Для измерения и записи температуры в отдельных шести точках стенда использовался электронный потенциометр-самописец с погрешностью измерения $\pm 0,5\%$ позволявший измерять температуру с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Для измерения э. д. с. термопар в остальных точках стенда, имеющих второстепенное значение, использовался потенциометр типа ПП-1. Предварительно самописец и ПП-1 проверялись по прецизионному потенциометру ППТ-1.

Тарирование термопар производилось по методике, изложенной в работе [5]. Кривые отклонений для всех проградуированных термопар настолько близки к прямым, что э. д. с., определенная при нормальной температуре возгонки двуокиси углерода ($-78,51^\circ\text{C}$ по Международной шкале), достаточна для установления характера зависимости «температура — э. д. с.» в области от 0 до -90°C . При этом обеспечивается точность тарировки во всем диапазоне до ± 2 мкв т. е. до $0,01^\circ\text{C}$. Результаты тарировки представлены на фиг. 6 в виде поправки э. д. с. термопар (ΔE мкв) к табличным данным. Заштрихованный сектор объединяет разброс точек показаний э. д. с. двадцати испытанных термопар. Так как максимальное отклонение в показаниях не превышает 2,5 мкв при $t = -60^\circ\text{C}$ (что соответствует разнице в определении температуры $0,1^\circ\text{C}$), им можно пренебречь и вводить поправку э. д. с. по средней линии сектора одинаковую для всех 20 термопар по соотношению:

$$E_{\text{действ.}} = E_{\text{изм}} + \Delta E,$$



Фиг. 6.

где ΔF — поправка, соответствующая данной температуре (отрицательная величина).

2) Измерение давлений.

Для измерения давления газа по тракту использовались ртутные и водяные пьезометры, обеспечивающие достаточную точность измерений для данной методики.

РАБОТА СТЕНДА ПРИ ВЫМОРАЖИВАНИИ ВЛАГИ ИЗ ГАЗА

Обработка воздуха, поступающего в измерительные головки гигрометров, ведется в следующей последовательности (фиг. 1).

Воздух с расходом $3 \div 5$ л/мин от воздушной сети с давлением 5 атм очищается от механических примесей и масла в фильтре тонкой очистки марки МН 2732-61. Фильтр двухступенчатый: предварительная фильтрация воздуха осуществляется при прохождении двух слоев стекловолнока, грубого и более тонкого; окончательная фильтрация — отделение мельчайших частиц-аэрозолей — осуществляется прохождением предварительно очищенного воздуха через фильтрующую ткань ФПП, обладающую особо сильными фильтрующими свойствами. Это обеспечивает общую эффективность фильтрации порядка 99,95% (по паспортным данным фильтра). Фильтр рассчитан на максимальный расход 120 л/мин. и наибольшее давление 6 атм.

Следует учесть, что при значительно меньшем расходе через фильтр степень очистки воздуха будет выше.

Высокая степень фильтрации воздуха позволят в значительной мере избежать образования тумана в процессе вымораживания влаги [4].

Очищенный воздух поступает в предварительный теплообменник для постепенного охлаждения газообразным азотом, проходящим по второму контуру. Газообразный азот получается путем испарения жидкого азота в сосуде Дьюара типа СД-15 с помощью электронагревателя переменной мощности. Температура поверхности внутренней трубки предварительного теплообменника регулируется расходом азота путем изменения мощности, подаваемой на нагреватель, а также частичным перепуском в атмосферу паров азота через предохранительный клапан.

Температура точки росы воздуха перед теплообменником контролируется вспомогательным гигрометром ВГ-3.

В предварительном теплообменнике влага из воздуха частично вымораживается и кристаллизуется на его стенке.

После предварительного теплообменника воздух, имеющий температуру на $5 \div 7^\circ\text{C}$ выше заданной T , поступает по теплоизолированному трубопроводу в верхнюю часть основного теплообменника.

Температура поверхности теплообменника поддерживается постоянной и равной T с помощью азотной холодильной камеры.

При движении воздуха по теплообменнику сверху вниз в результате длительного контакта его с развитой поверхностью теплообменника температура воздуха становится равной T , соответственно температура точки росы воздуха приближается к T .

Направление воздуха (сверху вниз) в основном теплообменнике выбрано с учетом возможного градиента температур по его высоте.

При любой величине этого градиента более низкую температуру будет иметь нижняя зона теплообменника и ее температура является определяющей для точки росы выходящего воздуха.

Выходящий из основного теплообменника обработанный воздух поступает в измерительные головки проверяемых индикаторов влажности.

Места заделки термопар показаны на фиг. 1, 3, 4.

Для предотвращения проникновения паров азота из рабочего объема азотной холодильной камеры внутрь основного теплообменника в случае возможного нарушения герметичности последнего служат два жидкостных пьезометра:

P_T — избыточное давление воздуха внутри основного теплообменника;

P_K — избыточное давление паров азота в рабочем объеме камеры.

Основным условием надежности работы стенда в этом отношении является неравенство $\Delta P_T > \Delta P_K$.

Для контроля давления в измерительных головках предназначен пьезометр ΔP_r .

РАБОТА СТЕНДА ПРИ НАСЫЩЕНИИ ВЛАГОЙ ГАЗА

Схема стенда в варианте насыщения влагой газа представлена на фиг. 2, основные агрегаты остаются те же, меняется направление газа.

В качестве контрольного газа используется газообразный азот, полученный испарением жидкого азота в сосуде СД-15 и имеющий первоначальную температуру точки росы порядка — 195°C .

Основным требованием к стенду в данном варианте является создание условий, при которых проходящий по тракту азот вплоть до выхода из основного теплообменника не будет иметь температуру выше T . При этих условиях азот будет насыщаться влагой до $t_p \ll T$. При этом возможна некоторая неполнота насыщения, но пересыщение исключается.

Газообразный азот поступает в предварительный теплообменник для постепенного нагрева и частичного увлажнения. По второму контуру теплообменника в зависимости от режима работы может проходить либо воздух (для подогрева), либо пары азота (для поддержания требуемой отрицательной температуры).

После предварительного теплообменника азот, имеющий температуру на $3\text{--}5^\circ\text{C}$ ниже заданной T , поступает по теплоизолированному трубопроводу в нижнюю часть основного теплообменника. Проходя через теплообменник и контактируя с его поверхностью, предварительно покрытой слоем льда, азот насыщается влагой, температура его приближается к температуре поверхности.

Температура точки росы азота на выходе из теплообменника становится близкой к температуре верхней зоны теплообменника, которая с помощью азотной холодильной камеры поддерживается равной величине T .

Из основного теплообменника насыщенный азот направляется в измерительные головки проверяемых индикаторов влажности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ВИХРЕВЫХ ИНДИКАТОРОВ ВЛАЖНОСТИ НА СТЕНДЕ

Предварительные испытания вихревого индикатора влажности проводились согласно вышеприведенной методике путем вымораживания влаги из воздуха (схема стенда на фиг. 1) и насыщения влагой азота (схема стенда на фиг. 2).

Испытания проводились в диапазоне температуры точки росы контрольного газа $T=0 \div -60^\circ\text{C}$ при следующих фиксируемых значениях T :

1. $T=0 \div -5^\circ\text{C}$;
2. $T=-(20 \div 25)^\circ\text{C}$;
3. $T=-(40 \div 45)^\circ\text{C}$;
4. $T=-(55 \div 60)^\circ\text{C}$.

На каждом из четырех температурных режимов поверхность основного теплообменника, через который пропусклся контрольный газ, выводилась на заданную температуру T и поддерживалась на этом режиме необходимое время.

Как показали эксперименты, конструкция стенда обеспечила достаточную равномерность распределения температур по поверхности основного теплообменника при небольшом температурном градиенте по его высоте. Результаты измерений приведены в таблице 1. Указанное распределение температур стабильно поддерживалось во время проведения экспериментов.

За определяющую температуру T принималась температура t_2 поверхности теплообменника в нижней его части.

Предварительный теплообменник в настоящих испытаниях в работу не включался.

На каждом температурном режиме в основной теплообменник вначале подавался воздух под небольшим избыточным давлением ($P_t=60$ мм. вод. ст.) с расходом 10 л/мин. При этом на режимах

°C				
t_1	-3	-21,3	-43	-56
t_2	-3	-21,3	-43	-56
t_3	-3	-21,3	-43	-56
t_8	-3	-21	-42,5	-54,6
t_9	-3	-21	-43	—
t_{10}	-3,5	-22	-43,5	-55
t_{12}	-1,8	-20,0	-41,5	-56,5
t_{13}	-2,0	-20,5	-42	-54
t_{14}	-2,4	-21	-42	-54,5
t_{15}	-2,7	-21	-42,5	-55
t_{16}	-3	-21	-43	-55,5
$V, \text{ л/мин}$	10	10	10	10
$\Delta P_T \text{ мм в. ст.}$	60	60	60	60

$T=0^\circ\text{C}$ и $T=-20^\circ\text{C}$ воздух подавался из окружающей среды путем нагнетания центробежным вентилятором. Температура точки росы воздуха перед стендом составляла $+(10 \div 12)^\circ\text{C}$.

На режимах $T=-40^\circ\text{C}$ и $T=-55^\circ\text{C}$ в теплообменник подавался воздух от компрессора при том же избыточном давлении и с температурой точки росы -30°C , чтобы избежать закупорки инеем входного патрубка теплообменника.

После проведения испытаний индикаторов влажности на вымороженном воздухе в основной теплообменник при том же его температурном режиме подавался сухой азот, который увлажнялся за счет вымороженной ранее влаги.

Результаты испытаний индикаторов влажности представлены в таблице 2.

В таблице указаны:

- режим работы стенда: вымораживание или увлажнение;
- температура выходящего из теплообменника контрольного газа (t_3) и температуры прилегающих к выходному патрубку участков поверхности теплообменника ($t_1=T$ и t_2);
- результаты измерений температуры точки росы индикатором влажности ВГ-3 № 01;
- разность между показаниями индикатора влажности и заданной температурой T : $\Delta t = t_p - t_1$.

Результаты предварительных испытаний показали:

1. Температура выходящего из теплообменника контрольного газа практически равна температуре прилегающих к выходному патрубку участков поверхности основного теплообменника, что повышает степень достоверности результатов, получаемых на стенде.

2. В области $T=0^\circ\text{C}$ вихревой индикатор влажности определил температуру точки росы контрольного газа на $0,2 \div 0,7^\circ\text{C}$ выше значения T , т. е. точность его показаний укладывается в величину $\Delta t = +1^\circ\text{C}$.

Результаты предварительных испытаний вихревого индикатора влажности

№ п/п	Режим работы стенда	Время мин.	t_1 [°C]		t_2 [°C]		t_3 [°C]		$\Delta P_{T.м.м.}$ в. с.		t_p [°C]		Δt [°C]
			3	4	5	6	7	8	9	10			
1	2	3	— 3		— 3	— 3	— 3	— 3	60	20	— 2,3	+0,7	
2	Вымораживание от вентилятора	0	— 3		— 3	— 3	— 3	— 3	60	20	— 2,3	+0,7	
3		5	— 3		— 3	— 3	— 3	— 3	60	20	— 2,3	+0,7	
4		10	— 3		— 3	— 3	— 3	— 3	60	20	— 3,0	0	
5		15	— 3		— 3	— 3	— 3	— 3	60	20	— 2,8	+0,2	
6		20	— 3		— 3	— 3	— 3	— 3	60	20	— 2,3	+0,7	
7		25	— 3		— 3	— 3	— 3	— 3	60	20	— 2,3	+0,7	
8		30	— 3		— 3	— 3	— 3	— 3	60	20	— 2,5	+0,5	
9		0	— 21		— 21	— 21	— 21	— 21	60	20	— 23	— 2,0	
10		5	— 21,3		— 21,3	— 21,3	— 21,3	— 21,3	60	20	22,7	— 1,4	
11		12	— 21,3		— 21,3	— 21,3	— 21,3	— 21,3	60	20	— 22,3	— 1,0	
12		17	— 21,3		— 21,3	— 21,3	— 21,3	— 21,3	60	20	— 23	— 1,7	
13		23	— 21,3		— 21,3	— 21,3	— 21,3	— 21,3	60	20	— 23	— 1,7	
14	Увлажнение азота	40	— 21,8		— 21,8	— 21,8	— 21,8	— 21,8	55	20	— 23	— 1,2	
15		46	— 21,8		— 21,8	— 21,8	— 21,8	— 21,8	55	20	— 23,2	— 1,4	
16		53	— 22		— 22	— 22	— 22	— 22	60	20	— 23,2	— 1,2	
17		60	— 22		— 22	— 22	— 22	— 22	55	20	— 23,2	— 1,2	
18		67	— 21,8		— 21,8	— 21,8	— 21,8	— 21,8	55	20	— 23,2	— 1,4	
19		72	— 21,8		— 21,8	— 21,8	— 21,8	— 21,8	55	20	— 23,2	— 1,4	
20	Вымораживание от компрессора	80	— 21,8		— 21,8	— 21,8	— 21,8	— 21,8	55	20	— 23,2	— 1,4	
21		0	— 43		— 43	— 43	— 43	— 43	60	20	— 43,7	— 0,7	
22	5	— 43		— 43	— 43	— 43	— 43	60	20	— 43,7	— 0,7		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
22	Вымораживание от компрессора	10	-43	-43	-43	60	20	-43,7	-0,7
23	»	15	-43	-43	-43	60	20	-43,7	-0,7
24	»	20	-43	-43	-43	60	20	-43,7	-0,7
25	»	25	-43	-43	-43	60	20	-43,7	-0,7
26	»	30	-43	-43	-43	60	20	-43,7	-0,7
27	Увлажнение азота	45	-42,7	-42,7	-42,7	60	20	-43,7	-1,0
28	»	50	-42,7	-42,7	-42,7	60	20	-32,7	-1,0
29	»	55	-43	-43	-43	60	20	-44,0	-1,0
30	»	60	-43	-43	-43	60	20	-44,0	-1,0
31	»	65	-43	-43	-43	60	20	-44,2	-1,2
32	Вымораживание от компрессора	0	-56	-56	-56	60	20	-59	-3,0
33	»	10	-56	-56	-56	60	20	-58,7	-2,7
34	»	17	-56	-56	-56	60	20	-59	-3,0
35	»	26	-56	-56	-56	60	20	-59	-3,0

Отличие точки росы от T можно объяснить неполным вымораживанием контрольного газа в области 0°C .

3. В области $T = -20^{\circ}\text{C}$ индикатор влажности определил температуру точки росы контрольного газа при вымораживании с наибольшим отклонением от T на -2°C , при увлажнении — на $-1,4^{\circ}\text{C}$, т. е. точность его показаний относительно стандарта укладывается в величину $\Delta t = -2^{\circ}\text{C}$.

4. В области $T = -40^{\circ}\text{C}$ наибольшее отклонение при вымораживании составило $-0,7^{\circ}\text{C}$, при увлажнении $-1,2^{\circ}\text{C}$, т. е. ошибка не превышает $\Delta t = -1,2^{\circ}\text{C}$.

5. В области $T = -55^{\circ}\text{C}$ наибольшее отклонение при вымораживании составило -3°C , т. е. ошибка не превышает $\Delta t = -3^{\circ}\text{C}$.

Отрицательные значения ошибок измерения на режимах вымораживания кажутся парадоксальными и, вероятно, должны быть объяснены наличием систематической ошибки в схеме индикатора влажности ВГ-3. Важно отметить, что разность в определении точки росы на режимах увлажнения и вымораживания не превышает 3°C .

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика аттестации индикаторов влажности, основанная на возможности получения газа с заданной точкой росы.

2. Создан стенд, позволяющий получать газ с заданной фиксированной точкой росы в диапазоне $(0) \div (-80)^{\circ}\text{C}$ и производить контрольные испытания индикаторов влажности, работающих по методу точки росы.

3. Предварительные испытания стенда показали удовлетворительные результаты с точки зрения точности и стабильности поддержания заданного режима во времени.

4. Ввиду практически полного отсутствия в литературе сведений о методах получения газа с заданной точкой росы в области отрицательных температур, необходимо проведение дальнейших исследований на стенде с целью повышения точности и достоверности получаемых результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Спенсер-Грегори, Е. Роурке. Гигрометрия, М., 1963 (пер. с английского).

2. А. А. Шмыков. Контролируемые атмосферы, М., 1953.

3. М. А. Берлинер. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности, М.-Л., 1965.

4. А. Г. Амелин. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. Из-во «Химия», М., 1966.

5. Методы измерения температуры. Часть II. Сборник статей под ред. д. х. н. В. А. Соколова, И. Л., 1954.