

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»
(УГЛТУ)

Ю. А. Горбатенко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Методические указания к лабораторному практикуму
Направления 20.03.01 «Техносферная безопасность»,
18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».
Дисциплина «Технология рекуперации газовых выбросов»
Очная и заочная формы обучения

Екатеринбург
2021

Печатается по рекомендации методической комиссии Химико-технологического института. Протокол № 1 от 02 октября 2020 г.

Рецензент – доцент УГЛТУ канд. техн. наук А. Р. Минакова

Редактор Л. Д. Черных
Оператор компьютерной верстки Е. Н. Дунаева

Подписано в печать

Плоская печать

Заказ №

Формат 60×84 1/16

Печ. л. 1,63

Поз. № 16

Тираж 20 экз.

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ
Сектор оперативной полиграфии РИО УГЛТУ

ВВЕДЕНИЕ

Влажность воздуха относится к одной из основных его характеристик, которая учитывается при определении плотности пылевоздушной смеси, вязкости и теплоёмкости газов, а также при расчете и оценке эффективности работы пылегазоочистного оборудования.

Содержание водяных паров в воздухе имеет большое значение для процессов пылеулавливания. Так, недостаточное увлажнение воздуха может снизить эффективность работы сухого электрофилтра в результате повышения электрического сопротивления пыли. Кроме того, высокая влажность при низкой температуре может вызвать конденсацию водяных паров, при которой возможна коррозия, а также затруднения с очисткой изоляции и электродов, удаление уловленной пыли. Работа рукавного филтра при влажности воздуха ниже температуры точки росы ведет к «замазыванию» тканевых перегородок, их химической и механической порче, существенно затрудняется, а иногда становится невозможной регенерация рукавов, что значительно повышает текущие затраты на очистку 1 м³ запыленного воздуха.

Таким образом, для оценки и контроля эффективности работы пылегазоочистного оборудования необходим полный анализ газовой среды, поступающей на очистку, и в том числе данные о его влажности. В данном методическом пособии, рассмотрены теоретические аспекты определения влажности воздуха, а также представлены методики закрепления теоретических навыков на практике.

1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЗОВ, СОДЕРЖАЩИХ ВОДЯНЫЕ ПАРЫ И СВЯЗЬ МЕЖДУ НИМИ

Водяной пар, почти всегда присутствующий в подлежащей очистке газовой смеси, относится к числу наименее стабильных из её компонентов. Концентрация водяных паров может существенно изменяться в результате увлажнения или охлаждения газа, в результате очистки газа в скрубберах и т.п.

Согласно закону Дальтона, барометрическое давление (B) атмосферного воздуха складывается из суммы парциальных давлений сухой части воздуха (P_C) и водяных паров (P_B):

$$B = P_C + P_B.$$

Атмосферный воздух содержит определенное количество водяного пара, который принято выражать через абсолютную влажность (весовое влагосодержание) или через относительную влажность, показывающую степень насыщения воздуха водяными парами. Водяной пар в воздушной среде может находиться в насыщенном состоянии. Состояние насыщения воздуха или газа водяными парами наступает, когда 1 м³ его содержит максимально возможное количество водяных паров при данной температуре. При незначительном снижении температуры происходит частичная конденсация водяных паров. Температура, соответствующая началу конденсации водяных паров, называется «точкой росы». Кроме того, водяной пар характеризуется определенной упругостью или парциальным давлением, которое эквивалентно весовому содержанию водяного пара. Максимальное парциальное давление водяного пара имеет место при состоянии насыщения. Таким образом, для определения относительной влажности и влагосодержания воздуха достаточно определить его парциальное давление и по формулам провести расчет соответствующих величин.

Концентрацию водяных паров, например, часто относят не к общему объему или массе смеси газов, включая и водяной пар, а к той части смеси, которая состоит из относительно стабильных компонентов, то есть к объему или массе сухих газов.

Для выражения влагосодержания газов чаще всего применяются следующие способы:

1) массовое содержание (концентрация) водяных паров в газе (x), выраженная в кг или г. на 1 кг сухого воздуха [кг/кг] или [г/кг] соответственно;

2) концентрация водяных паров f , отнесенная к 1 м³ сухого воздуха при нормальных условиях (0 °С; 760 мм.рт.ст), [кг/м³ сух.] или [г/м³ сух.]; концентрация водяных паров f'' , отнесенная к 1 м³ влажного воздуха при нормальных условиях, [кг/м³ вла.] или [г/м³ вла.]; концентрация водяных паров f''' , отнесенная к 1 м³ влажного воздуха при данных температуре и давлении, [кг/м³] или [г/м³]:

$$f''' = P_B \cdot 1,06 \cdot 10^{-3},$$

где P_B – парциальное давление водяных паров в воздухе (газе), мм.рт.ст.;

$1,06 \cdot 10^{-3}$ – переводной коэффициент, равный

$$\frac{18}{22,4 \cdot 760} = 1,06 \cdot 10^{-3},$$

где 18 – молекулярная масса водяных паров, *кг/кмоль*;

22,4 – мольный объем, *м³/кмоль*;

760 – давление воздуха при нормальных условиях, *мм.рт.ст.*;

3) относительная влажность (φ), то есть степень приближения к насыщенному состоянию при данных условиях, [*масс. %*].

$$\varphi = \frac{f''}{f''} 100, \% \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{P_B}{P_{нас}} 100, \% ;$$

где $P_{нас}$ – парциальное давление водяного пара при насыщении для данной температуры, *мм.рт.ст.*, определяется по табл. (прил. 1);

4) парциальное давление водяных паров (P_B) в воздухе (газе), [*мм. рт. ст.*];

5) объемный процент [*об. %*], равный $\left(\frac{P_B}{P_{ПОЛ}} \right) 100$;

где $P_{ПОЛ}$ – полное давление, равное сумме атмосферного (барометрического) давления и давления (избыточное, разрежение) в газоходе или аппарате (*мм.рт.ст.*):

$$P_{ПОЛ} = B \pm p.$$

Для различных характеристик влагосодержания воздуха справедливы следующие зависимости:

$$\varphi = \frac{P_B}{P_{нас}} = \frac{f'}{f'_{нас}} = \frac{f''}{f''_{нас}},$$

но в то же время

$$\varphi \neq \frac{f''}{f''} \neq \frac{x}{x_{нас}};$$

$$x = 0,622 \frac{\varphi P_{нас}}{P_{ПОЛ} - \varphi P_{нас}} = 0,622 \frac{f'}{0,804 - f'};$$

$$f = 1,293x; \quad f' = \frac{x}{\left(\frac{1}{1,293} + \frac{x}{0,804}\right)};$$

$$f'' = 0,00269 \cdot f' \frac{P_{\text{ПОЛ}}}{273 + t_B},$$

где φ – относительная влажность воздуха, *масс. %*;

1,293 – плотность водяного воздуха при нормальных условиях, *кг/м³*;

0,804 – плотность водяных паров при нормальных условиях, *кг/м³*;

t_B – температура воздуха, *°С*.

Если влажность газа выражена в каких-либо других единицах, то её следует привести по рассмотренным формулам к процентному содержанию (*масс. %*) или выразить через абсолютную влажность (f'' , *кг/м³*).

2. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГАЗА

В зависимости от степени насыщения газа водяными парами, состава газа и условий работы пылеулавливающего аппарата применяются различные методы, а именно, весовой, конденсационный (гравиметрический) и психрометрический методы.

2.1. Абсолютный весовой метод

Абсолютный весовой метод основан на способности некоторых веществ поглощать (адсорбировать) влагу из воздуха. К таким веществам относятся: силикагель; хлористый кальций; фосфорный ангидрид; серная кислота; пемза, смоченная серной кислотой. При выборе влагопоглотителя следует учитывать, что некоторые из них наряду с водяными парами могут также поглощать компоненты газовой смеси, например SO_2 , Cl_2 , CO_2 и др., что в конечном итоге может повлиять на достоверность полученных результатов.

Для определения влажности весовым методом определенное количество газа пропускают через два последовательно установленных поглотителя, заполненных веществом, поглощающим влагу (рис. 1).

Трубки с поглотителем взвешиваются на аналитических весах до (m_1) и после (m_2) анализа. Зная количество влаги и количество пропущенного газа (V_G), рассчитывают величину абсолютной влажности газа:

$$f'' = \frac{m_2 - m_1 \cdot 1000}{\left(V_G \tau \frac{273}{273 + t_G} \frac{B - P_{II}}{760} \right) + \left(\frac{m_2 - m_1}{0,804} \right)},$$

где m_1 – масса поглотителя до адсорбции водяных паров, г;

m_2 – масса поглотителя после анализа, то есть с уловленными водяными парами, г;

V_G – объем газа, пропущенный через трубки с поглотителем, л/мин;

τ – время пропускания исследуемого газа через трубки с поглотителем, мин;

t_G – температура исследуемого газа, замеренная после системы поглощения водяных паров, °C;

P_{II} – давление исследуемого газа, замеренное после системы поглощения водяных паров, мм. рт. ст.

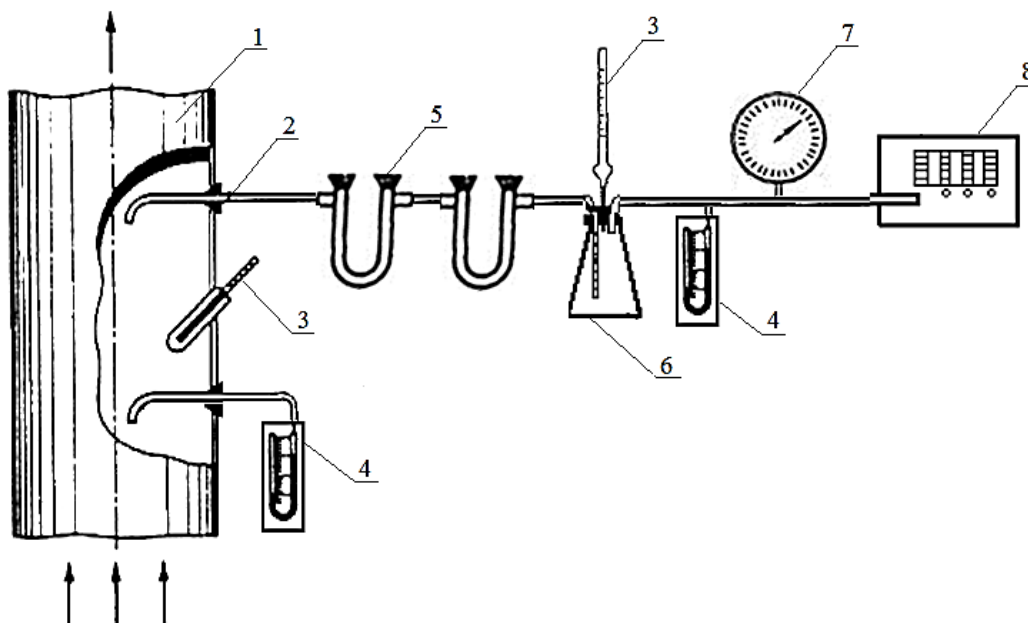


Рис. 1. Типовая схема установки по измерению влажности газа в газоходе весовым методом:

- 1 – газоход; 2 – пробозаборная трубка с фильтром; 3 – термометр; 4 – манометр;
 5 – U-образная трубка с поглотителем; 6 – гидравлический затвор (устанавливается только в случае применения жидкого поглотителя, например серной кислоты);
 7 – газовый счетчик; 8 – электроаспиратор (воздуходувка)

В процессе отбора пробы недопустимо снижение сопротивления фильтра с твердым поглотителем, поскольку это свидетельствует о его

насыщении водяными парами и их проскоке, что приведет к заниженным результатам анализа. Кроме того, необходимо строго контролировать скорость отбора пробы газа. Проба газа отбирается со скоростью 0,5...1,0 л/мин (продолжительность отбора 10...15 мин). При скоростях менее 0,5 л/мин водяные пары будут конденсироваться в пробозаборной трубке, при более высоких – будет наблюдаться проскок водяных паров и унос поглотителя, что приведет к повышению гидравлического сопротивления системы и заниженным данным по влажности исследуемого газа. При наличии в исследуемом газе тумана, типовую схему, представленную на рис. 1, использовать не рекомендуется, поскольку туман будет конденсироваться в пробозаборной трубке, что приведет к заниженным результатам анализа. Для определения влажности газов, содержащих туман (температура газа в этом случае колеблется от 40 до 60 °С), используется метод «с внутренней фильтрацией». Устройство для пробоотбора, представленное на рис. 2, включает специальную пробозаборную трубку 4. Внешний конец трубки, охлаждаемый воздухом, выполнен в виде капилляра диаметром 1,5 мм, что обеспечивает вынос сконденсировавшихся паров воды в поглотители 8, заполненные, например, фосфорным ангидридом. Для предотвращения забивания капилляра пылевыми частицами начало пробозаборной трубки снабжено фильтром из стекловолокна 2.

Абсолютный весовой метод достаточно точен, но практическое его применение связано с определенными сложностями, в частности, с расходом реагентов, поэтому на практике данный метод применяется крайне редко.

2.2. Конденсационный (гравиметрический) метод

В случаях, когда содержащиеся в исследуемом газе компоненты вступает в химическую реакцию с поглотителями, применяют конденсационный метод. Конденсационный метод основан на измерении количества сконденсированных паров воды в пробе газа известного объема, отобранных из газохода и охлажденных ниже температуры точки росы. Охлаждение газа можно вести до любой температуры, но непременно она должна точно определяться и быть ниже температуры точки росы. Отбираемый газ пропускается по газоходу, охлаждаемому холодной водой. Замер отбираемого количества газа проводится с помощью газового счетчика, либо ротаметра, а разрежение и температуры – манометром и термометром, соответственно. Схема измерения влажности газа конденсационным (гравиметрическим) методом представлена на рис. 3.

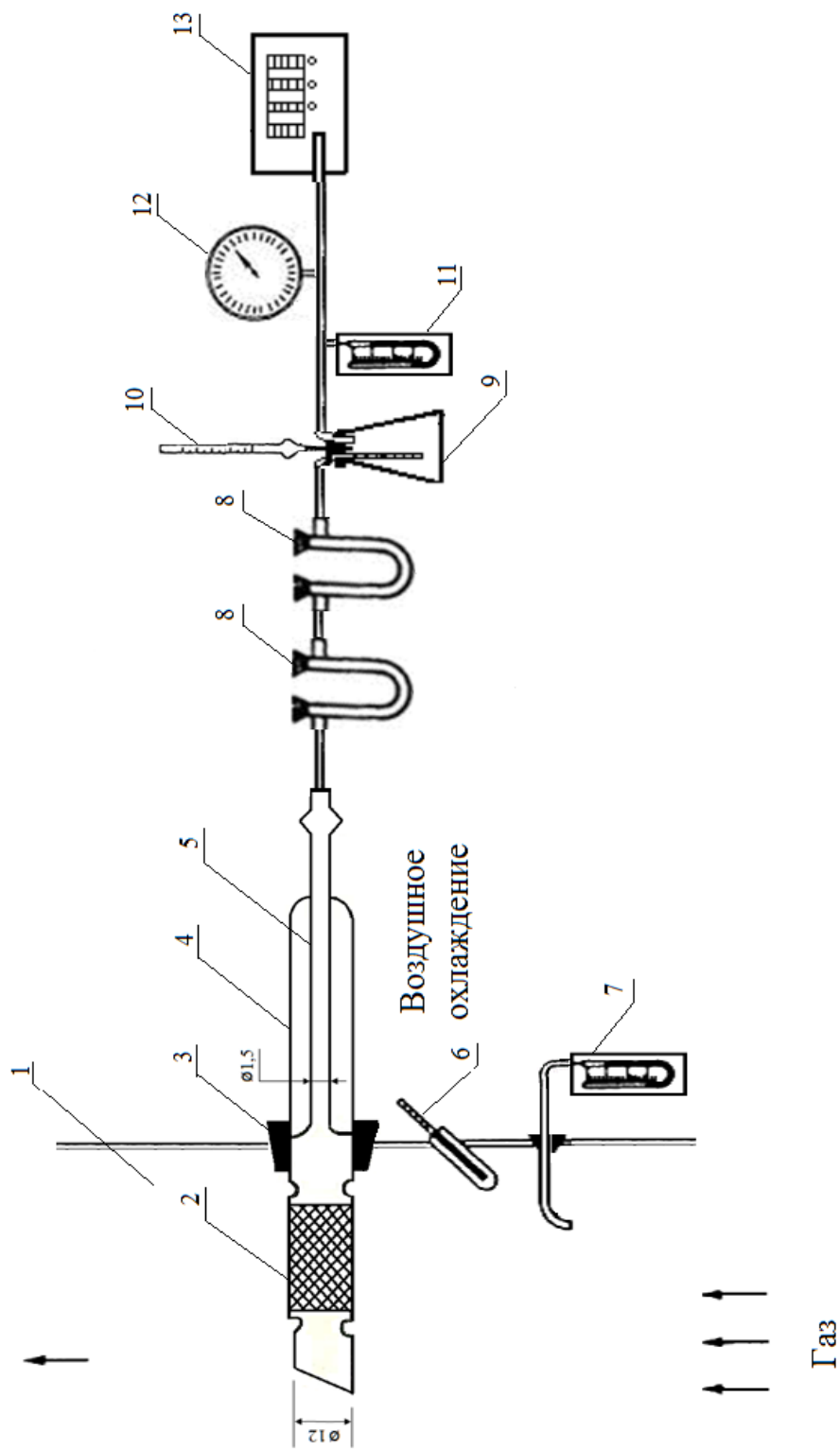


Рис. 2. Типовая схема установки по определению влажности газа в газоходе методом внутренней фильтрации с предварительным выделением из газового потока пыли и тумана:
 1 – газосход; 2 – фильтр из стекловолокна; 3 – резиновая пробка; 4 – заборная трубка с внутренней фильтрацией; 5 – капилляр; 6, 10 – термометр; 7, 11 – манометр; 8 – поглотители; 9 – гидравлический затвор (устанавливается только в случае применения жидкого поглотителя); 12 – газовый счетчик; 13 – электроаспиратор (воздуходувка)

При отборе проб паров воды необходимо исключить выпадение конденсата воды по газовому тракту до устройства конденсации. С этой целью необходимо выполнить ряд условий:

- температура точки росы анализируемого газа должна быть выше 60°C ;
- не допускается попадание в устройство конденсации твердых взвешенных веществ, капельной влаги, а также веществ, влияющих на температуру точки росы;
- газозаборный тракт до холодильника должен быть минимальной длины и располагаться вертикально или под углом не менее 10° ;
- при температуре выше 100°C пробоотборный зонд и участок его соединения с устройством конденсации необходимо обогревать.

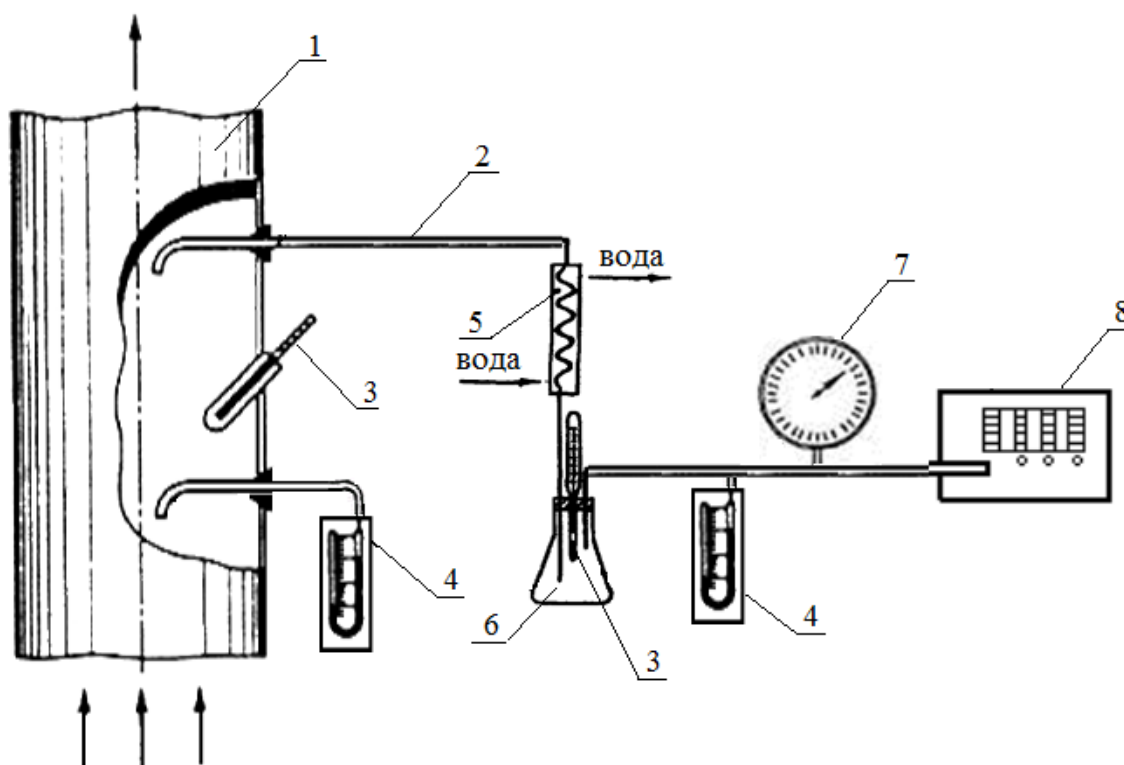


Рис. 3. Типовая схема установки по измерению влажности газа конденсационным (гравиметрическим) методом:
 1 – газоход; 2 – пробозаборная трубка с фильтром; 3 – термометр;
 4 – U-образный манометр; 5 – холодильник; 6 – коническая колба
 (или градуированная бюретка); 7 – газовый счётчик; 8 – электроаспиратор

Чтобы исключить попадание в градуированную бюретку твердых взвешенных веществ, пробозаборная трубка снабжается фильтрующим патроном, позволяющим устранить взвешенные вещества на стадии отбора пробы.

Объемная скорость газа, просасываемого через холодильник, должна составлять 3...4 л/мин. В случае, если исследуемый газ находится под разряжением, особое внимание необходимо уделить герметичности собранной схемы.

Количество содержащихся в газе водяных паров ($г/нм^3$ вл. газа) определяется как сумма сконденсировавшейся влаги и паров воды, оставшихся в насыщенном газе при данной температуре:

$$f' = \frac{m_1 + m_2 \cdot 1000}{\left(V_{Г\tau} \frac{273}{273 + t_K} \frac{B - P_K}{760} \right) + \left(\frac{m_1 + m_2}{0,804} \right)},$$

где m_1 – масса сконденсировавшейся влаги, равная объему жидкости в конической колбе (б, рис. 3), г;

m_2 – масса водяных паров, оставшихся в насыщенном газе при температуре конденсации (t_K), определенная по таблице (прил. 1), г:

$$m_2 = P_B(t_K) \cdot 1,06 \cdot 10^{-3};$$

$V_{Г}$ – объем газа после конденсации пара, измеренный по газовому счётчику (7), при температуре конденсации, л/мин;

τ – время пропускания исследуемого газа через систему конденсации, мин;

t_K – температура конденсации, $^{\circ}C$;

P_K – давление исследуемого газа, замеренное после системы поглощения водяных паров, мм. рт. ст.

2.3. Психрометрический метод

Метод основан на косвенном определении парциального давления водяных паров по показаниям температуры влажного и сухого термометров. При этом сухой термометр показывает температуру окружающего воздуха, а влажный, помещенный в ту же среду, – более низкую температуру из-за расхода теплоты на испарение воды и насыщение газа её парами.

Чем меньше содержится пара в окружающем воздухе, тем интенсивнее идет испарение с ртутного шарика влажного термометра и тем больше понижается его температура. По разности показаний температур сухого и влажного термометров определяется парциальное

давление водяных паров в окружающем воздухе при температуре сухого термометра:

$$P_B = P_{нас} - C(t_c - t_{вл})B,$$

где C – психрометрический коэффициент, зависящий от скорости движения воздуха около шарика влажного термометра. Для неподвижного газа $C = 0,00074$, а при скорости газа выше 5 м/с $C = 0,00066$;

t_c и $t_{вл}$ – показания сухого и влажного термометров, соответственно $^{\circ}\text{C}$.

Для определения влажности воздуха в помещении или вне его применяются психрометры различных конструкций.

Психрометр Августа относится к типу психрометров с неподвижным воздухом, так как испытуемый воздух при измерении должен находиться в состоянии покоя. Воздух в состоянии покоя практически не находится, поэтому полученные на психрометре Августа показания отклонятся от истинного значения измеряемой величины, что существенным образом ограничивает область использования данного психрометра.

Психрометр Ассмана состоит из двух одинаковых ртутных термометров 2 и 5 (рис. 4), закрепленных в специальной оправе, имеющей заводной механизм 3 с вентилятором, обеспечивающим протягивание исследуемого воздуха через термометры.

Для защиты от нагрева солнцем, термометры помещаются в двойную трубчатую защиту 1 с воздушным зазором между трубками 6. При этом наружная поверхность трубок тщательно полируется и никелируется. Сами трубки изолированы друг от друга и крепятся к пластмассовому тройнику воздухопроводной трубки, на верхнем конце которой укреплена аспирационная головка. Аспирационная головка состоит из заводного механизма и вентилятора, закрытых колпаком. Резервуар правого термометра 5 обернут батистом в один слой и перед работой смачивается дистиллированной водой или чистой дождевой или снеговой водой.

Перед определением влажности воздуха специальной пипеткой, наполненной водой, смачивают батист влажного термометра. Заводится пружина вентилятора, который обеспечивает постоянную скорость просасываемого воздуха, равную 2 м/с (поэтому показания психрометра Ассмана не зависят от скорости движения воздуха в помещении). При вращении вентилятора в прибор всасывается воздух,

который, обтекая резервуары термометров, проходит по воздухопроводной трубке к вентилятору и выбрасывается им наружу через прорези. Благодаря протеканию потока воздуха вокруг резервуаров термометров, сухой термометр будет показывать температуру затягиваемого вентилятором газового потока, а показания смоченного (влажного) термометра будут меньше, так как он будет охлаждаться вследствие испарения воды с поверхности батиста, облегающего его резервуар.

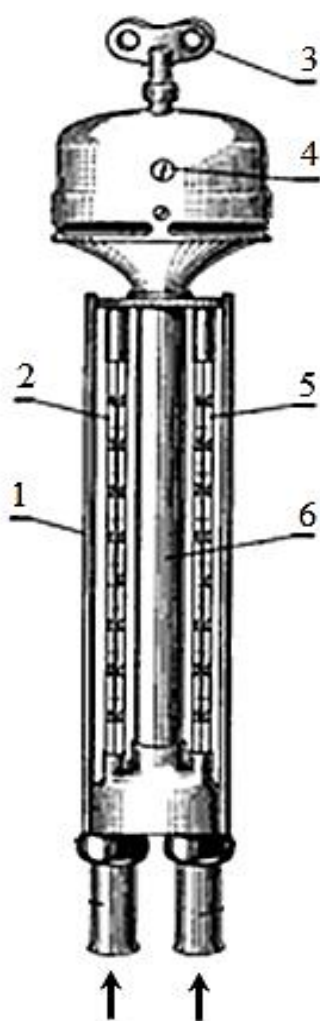


Рис. 4. Психрометр Ассмана (МВ-4М):

- 1 – металлическая оправа;
- 2 – сухой термометр; 3 – заводной механизм;
- 4 – колпак вентилятора;
- 5 – влажный термометр; 6 – гильза с воздушной прослойкой

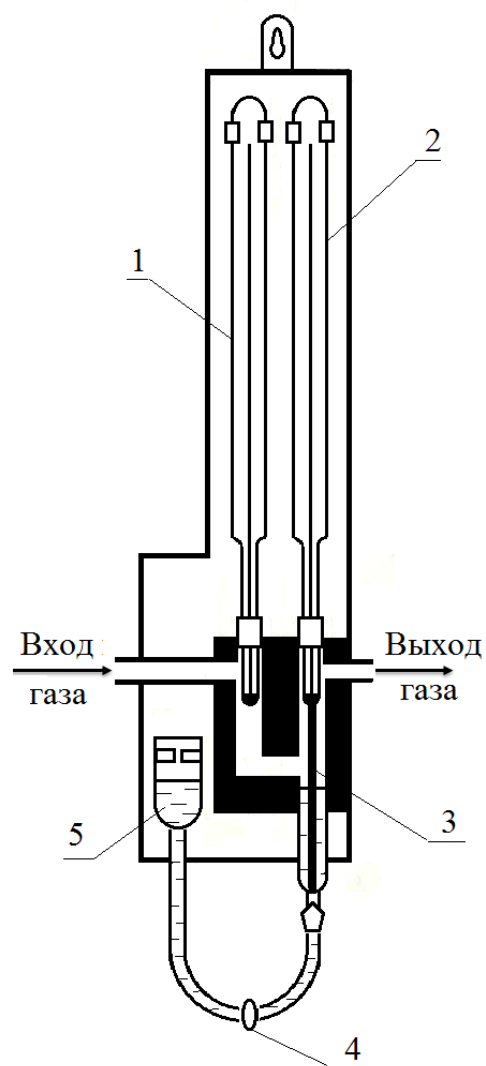


Рис. 5. Психрометр института Гинцветмет:

- 1 – сухой термометр; 2 – влажный термометр; 3 – влажная ткань (фитиль);
- 4 – зажим; 5 – баллон с водой

Отсчёт показаний термометров проводится во время работы вентилятора через 3...5 мин после его включения, когда температура влажного термометра станет стабильно минимальной.

Влажность воздуха определяется по показаниям сухого и влажного термометров по специальным психрометрическим таблицам или психрометрическому графику (прил. 2).

Основным недостатком психрометра Ассмана является невозможность его применения для определения влажности запыленного газового потока, поскольку пыль, оседающая на батисте влажного термометра, влияет на процесс испарения влаги, и, как следствие, искажает психрометрическую разность температур. Для определения влажности у запыленного газового потока используют психрометры конструкции института Гинцветмета.

Психрометр Гинцветмет (рис. 5) состоит из корпуса с входным и выходным патрубком, в который на резиновых пробках вставлены два ртутных или спиртовых термометра со шкалой от 30 до 100 °С и ценой деления до 0,2 °С. К ртутному шарикю одного из термометров привязан батистовый фитиль (3), другой конец которого погружается в баллончик с водой. На фитиль надевается стеклянная трубка, заполненная водой, защищающая ткань от пылевых частиц. Для обеспечения длительной работы без добавления в него воды психрометр снабжается дополнительным баллоном (5), заполненным водой и соединенным шлангом с основным баллоном. Термометры защищены кожухом.

Газ, влажность которого следует определить, предварительно очищается от пыли в фильтровальном патроне, присоединенном к входному патрубку психрометра, после чего омывает сухой термометр, направляется во второе колено прибора, омывает влажный термометр и выходит через патрубок.

Расход газа, необходимый для правильного показания психрометра, должен составлять 15...20 л/мин. Для расчета влажности требуется значение разряжения в психрометре, которое с достаточной степенью точности можно принять равным разряжению перед газовым счётчиком, измеренному манометром.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Цель работы и техническое задание

Цель работы: знакомство с основными способами определения влажности атмосферного воздуха.

Во время работы необходимо:

- 1) определить абсолютную влажность воздуха весовым методом;
- 2) определить относительную влажность воздуха психрометрическим методом (с использованием психрометров Ассмана и Гинццветмет);
- 3) пересчитать абсолютную влажность в относительную и сравнить полученные данные с эталоном;
- 4) сделать выводы.

Работа № 1. Определение влажности воздуха весовым методом

Метод основан на способности некоторых химических реактивов поглощать влагу. Применяется для измерения влажности газов, не насыщенных водяными парами.

Методика проведения эксперимента

Для определения влажности воздуха U-образную трубку (2), заполненную силикагелем, необходимо взвесить на аналитических весах и присоединить её к системе, согласно схеме (рис. 6).

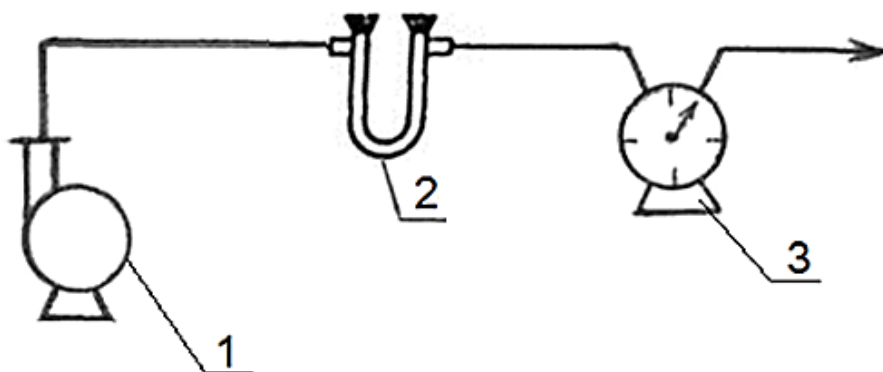


Рис. 6. Схема изучения процесса равновесного поглощения влаги из воздуха абсолютным весовым методом:

- 1 – воздуходувка; 2 – U-образная трубка, заполненная силикагелем;
3 – газовый счетчик

Собрав схему, необходимо пропустить через систему точный объем воздуха (*объем пропускаемого воздуха задается преподавателем*). После эксперимента необходимо вновь взвесить *U*-образную трубку на аналитических весах и рассчитать абсолютную влажность воздуха ($г/нм^3$):

$$f' = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{V_0},$$

где m_1 – масса трубки до эксперимента, $г$;

m_2 – масса трубки после эксперимента, $г$;

V_0 – объем пропущенного воздуха, приведенный к нормальным условиям ($нл$):

$$V_0 = \frac{V_2 B \cdot 273}{760 \cdot 273 + t} + \frac{m_2 - m_1}{0,804},$$

где V_2 – объем пропущенного воздуха, $л$;

B – барометрическое давление, $мм.рт.ст.$;

t – температура воздуха, $^{\circ}C$;

$0,804$ – плотность водяного пара, $кг/нм^3$, $г/л$.

Для получения достоверного результата необходимо **повторить опыт дважды!** При этом используют новую (из сушильного шкафа) *U*-образную трубку, заполненную силикагелем.

Результаты эксперимента занести в табл. 1.

Таблица 1

Определение влажности атмосферного воздуха
абсолютно весовым методом

№ опыта	Масса <i>U</i> -образной трубки до опыта (m_1), $г$	Масса <i>U</i> -образной трубки после опыта (m_2), $г$	Масса уловленных водяных паров ($m = m_2 - m_1$), $г$	Объем пропущенного воздуха (V_2), $л$	Объем пропущенного воздуха при н.у. (V_0), $нл$	Значение абсолютной влажности (f'), $г/нм^3$	$f'_{ср}$, $г/нм^3$
1							
2							

Работа № 2. Определение влажности воздуха психрометрическим методом

Метод основан на измерении влагосодержания газов, не насыщенных водяными парами, по разности температур сухого и влажного термометров.

Задача № 2.1. Определение влажности воздуха психрометром Ассмана

Методика проведения эксперимента

1. Смочить батист на резервуаре термометра (*смачивание проводится за 4 мин./ до начала наблюдений!*). Для этого берется резиновый баллон с пипеткой, заранее наполненный водой, и легким нажимом вода в пипетке доводится до черты. Если черта отсутствует, то вода подводится не ближе, чем на 1 см до края пипетки, и удерживается в ней на этом уровне при помощи зажима. Пипетка вводится во внутреннюю трубку психрометра, и смачивается батист на резервуаре термометра. Через 2...3 мин, не вынимая пипетки из трубки, разжимают зажим, выбирая излишнюю воду в баллон, после чего пипетка вынимается.

2. Завести вентилятор (аккуратно, чтобы не сорвать пружину). Заводной механизм должен работать не менее 4 мин!

3. Снять показания с сухого и влажного термометров.

4. Определить, на основании полученных данных, относительную влажность по психрометрическому графику (прил. 2) (рис. 6). Для этого по вертикальным линиям отмечают показания сухого термометра, а по наклонным – показания смоченного (влажного) термометра и на пересечении этих линий получают значение относительной влажности, выраженное в процентах.

Опыт повторяют через 30...40 мин. Результаты эксперимента заносят в табл. 2.

Таблица 2

Определение влажности воздуха психрометром Ассмана

№ опыта	Показания сухого термометра, °С	Показания влажного термометра, °С	Относительная влажность воздуха (φ), масс. %	$\varphi_{ср}$, масс. %
1				
2				

Задача № 2.2. Определение влажности воздуха с помощью психрометра конструкции института Гинцветмет

Методика проведения эксперимента

1. Включить компрессор. В данном методе воздух прокачивается через психрометр компрессором.

2. Через 15...20 мин (после того, как установились постоянные показания термометров) записываются значения температуры сухого и влажного термометров и разрежение перед психрометром ($P_{\text{мм. вод. ст.}}$, мм. вод. ст.).

3. Опыт проводят дважды с интервалом в 30...40 мин и результаты заносят в табл. 3.

Таблица 3

Определение влажности воздуха психрометром Гинцветмет

Температура, °C			Давление, мм.рт.ст.				Парциальное давление вод. паров, мм.рт.ст.		Влажность газа в газоходе	
*в газоходе	сухого термометра	влажного термометра	барометрическое (B)	манометрическое (P _c)	**вакуумметрическое у психрометра (P _n)	абсолютное в газоходе (P _{общ})	в анализируемом газе (P _в (анализ. газ))	в газоходе (P _в (газоход))	абсолютная (f'), г/м ³	относительная (φ), %

*Определяется по температуре окружающей среды.

**Разрежение после психрометра (P_n) принимается на 20 % больше, чем перед психрометром (P_c).

Обработка результатов измерений

1. Рассчитываем манометрическое давление газа (разряжение перед психрометром) (P_Г). Для этого показания, снятые с манометра в мм. вод. ст., пересчитываем в мм. рт. ст.:

$$P_c = \frac{P_{\text{мм. вод. ст.}} \cdot 760}{1,03 \cdot 10^4},$$

где P_{мм. вод. ст.} – разряжение перед психрометром, мм. вод. ст.

2. Рассчитываем общее давление в системе (мм. рт. ст.):

$$P_{\text{общ}} = B - P_n,$$

где B – барометрическое давление, мм. рт. ст.;

P_n – вакуумметрическое у психрометра, мм. рт. ст.

3. Рассчитываем давление паров воды в анализируемом газе (мм. рт. ст.):

$$P_{v(\text{анализ газ})} = P_m - c (t_c - t_v) P_{\text{общ}},$$

где $P_{v(\text{анализ газ})}$ – давление водяных паров в воздухе анализируемой пробы (проходящей через психрометр), мм. рт. ст.;

P_m – давление водяных паров при насыщении для данной температуры, мм. рт. ст. (принимается по таблице (прил.) при температуре влажного термометра);

c – постоянная психрометра, зависящая от скорости движения газа около смоченного термометра. Для неподвижного газа (или движение с малой скоростью 1...2 л/мин) $c = 0,00074$, а при скорости выше 18...20 л/мин $c = 0,00066$;

t_c, t_v – температура сухого и влажного термометров, соответственно, °С.

4. Рассчитывается парциальное давление водяных паров в газе, находящемся в газоходе (мм. рт. ст.):

$$P_{v(\text{газоход})} = \frac{P_{v(\text{анализ газ})} B - P_{\Gamma}}{B - P_n}.$$

5. Рассчитываем относительную влажность воздуха (масс. %):

$$\varphi = \frac{P_{v(\text{газоход})}}{P'_m} 100,$$

где P'_m – давление водяных паров при насыщении для температуры газа в газоходе (принимается из таблицы (прил. 1) при температуре сухого термометра).

Полученные в ходе выполнения лабораторной работы данные заносим в общую сводную таблицу (табл. 4).

Таблица 4

Влажность воздуха рабочей зоны, полученная различными методами

Метод Влажность	Абсолютный весовой метод	Психрометрический метод		*Эталон
		Психрометр Ассмана	Психрометр Гинцветмет	
Относительная влажность, <i>масс. %</i>				

*Определяется по показаниям барометра.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ, ВЫНОСИМЫХ НА КОЛЛОКВИУМ

1. Способы выражения влажности.
2. Пересчет относительной влажности в абсолютную, и наоборот.
3. Основные методы, используемые при определении влажности газового потока.
4. Суть весового метода. Типы используемых поглотителей.
5. Влияние скорости газового потока на определение влажности весовым методом.
6. Расчетные формулы, лежащие в основе определения влажности весовым методом.
7. Схемы установок определения влажности весовым методом.
8. Суть конденсационного метода. Схема определения влажности конденсационным методом.
9. Суть психрометрического метода определения влажности.
10. Принцип работы, область применения, преимущества и недостатки психрометра Августа.
11. Принцип работы, область применения, преимущества и недостатки психрометра Асмана.
12. Принцип работы, область применения, преимущества и недостатки психрометра Гинцветмета.

ПРИМЕРЫ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОГО КОЛЛОКВИУМА

1. Единица измерения абсолютной влажности:

- % (масс)
- кг/кг
- г/м³
- мм.рт.ст.
- % (об)

2. Назначение реометра – определение ... газа:

- давления
- объема
- температуры
- влажности

3. Значение относительной влажности (%), если абсолютная влажность равна 45 г/м³, а температура газа 60 °С: _____.

4. Значение относительной влажности (%), если температура сухого термометра 25 °С, а температура мокрого термометра 18 °С: _____.

5. Последствия движения влажного газового потока через поглотители со скоростью 0,6 л/ч:

- унос поглотителя
- проскок водяных паров
- конденсация паров в газоходе
- снижение сопротивления поглотителя с сорбентом
- повышение сопротивления поглотителя с сорбентом
- адсорбция водяных паров поглотителем

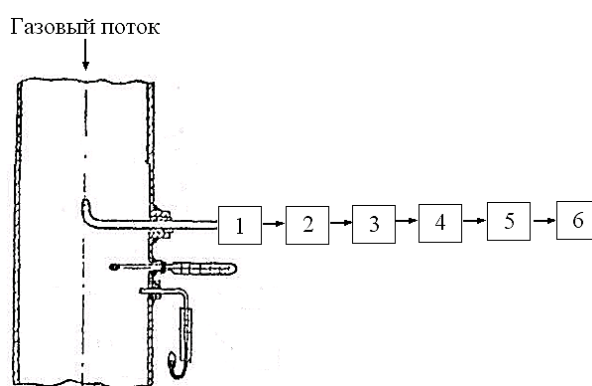
6. Температура газа (°С), при которой используется метод с внутренней фильтрацией пыли и тумана:

- 20
- 35
- 45
- 60
- 85

7. Психрометрический метод определения влажности газового потока основан на:

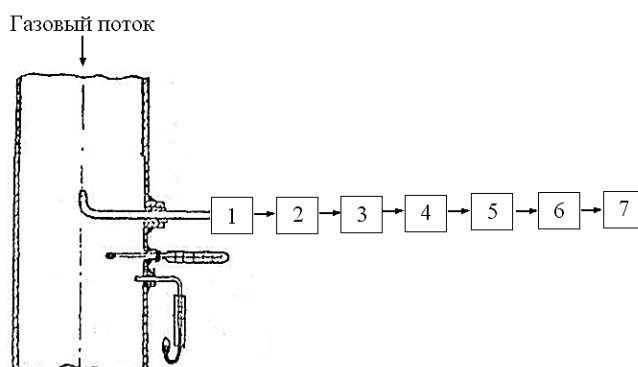
- поглощению влаги поверхностью твердого пористого тела
- поглощению влаги жидкими поглотителями
- охлаждению газа ниже температуры точки росы
- разности температур сухого и мокрого термометров
- разности температур мокрого и сухого термометров

8. Соответствие устройств в схеме определения влажности газового потока в газоходе весовым методом с использованием в качестве поглотителя серной кислоты:



	1-й поглотитель с серной кислотой
	2-й поглотитель с серной кислотой
	термометр
	манометр
	гидравлический затвор
	реометр

9. Соответствие устройств в схеме определения влажности газового потока в газоходе конденсационным методом:



	фильтровальный патрон
	холодильник
	градуированная бюретка
	термометр
	манометр
	реометр
	воздуходувка

10. Психрометр, используемый для определения влажности запыленного газового потока:

- Августа
- Ассмана
- Гинцветмет

11. Основной недостаток психрометра Ассмана:

- сложность определения
- низкая чувствительность
- невозможность анализа движущейся среды
- невозможность анализа запыленной среды

12. Величина m_1 в формуле $f = (m_1 - m_2)1000 / (V \cdot \tau + V_n)$ – это:

- масса сорбированных водяных паров
- масса поглотителя после адсорбции водяных паров
- масса поглотителя до адсорбции водяных паров
- масса сконденсировавшейся влаги
- масса водяных паров, оставшихся в насыщенном газе при температуре конденсации

13. Оптимальное значение скорости газа в системе (л/мин), при определении влажности газового потока конденсационным методом:

- 0,5...1
- 10...15
- 3...4
- < 20

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методическое пособие по аналитическому контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. – СПб.: НИИ Атмосфера, 2012. 57 с.
2. ГОСТ 17.2.4.07-90 Охрана природы. Атмосфера. Методы оправления влажности газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. – М.: Стандартиформ, 2008. 14 с.
3. ГОСТ Р 52361-2005 Контроль объекта аналитический. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2005. 17 с.
4. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков [и др.]. /Под общ. ред. А.А. Русанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. 321 с.

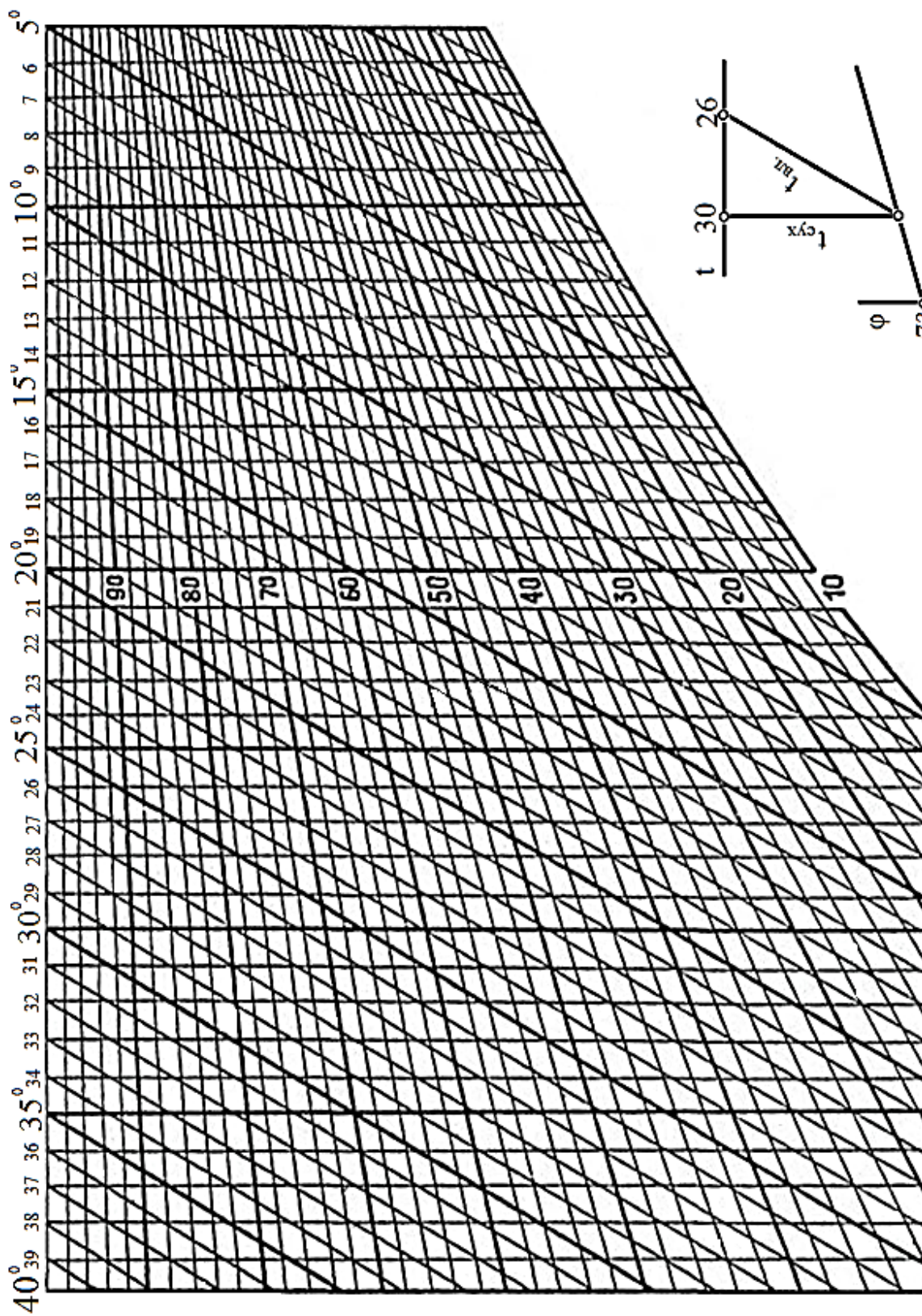
ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**ДАВЛЕНИЕ ВОДЯНЫХ ПАРОВ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Температура, °С	Давление водяных паров, мм. рт. ст.	Температура, °С	Давление водяных паров, мм. рт. ст.	Температура, °С	Давление водяных паров, мм. рт. ст.
0	4,58	34	39,9	65	187,5
5	6,5	35	42,2	66	196,1
6	7,0	36	44,6	67	205,0
7	7,5	37	47,1	68	214,2
8	8,0	38	49,7	69	223,7
9	8,6	39	52,4	70	233,7
10	9,2	40	55,3	71	243,9
11	9,8	41	58,3	72	254,6
12	10,5	42	61,5	73	265,7
13	11,2	43	64,8	74	277,2
14	12,0	44	68,3	75	298,1
15	12,8	45	71,9	76	301,4
16	13,6	46	75,7	77	314,1
17	14,5	47	79,6	78	327,3
18	15,5	48	83,7	79	341,0
19	16,5	49	88,0	80	355,1
20	17,5	50	92,6	85	433,6
21	18,7	51	97,2	90	525,8
22	19,8	52	102,1	95	633,9
23	21,1	53	107,2	100	760,0
24	22,4	54	112,5	105	906,1
25	23,8	55	118,0	110	1075
26	25,2	56	123,8	115	1268
27	26,7	57	129,8	120	1489
28	28,3	58	136,1	125	1741
29	30,0	59	142,6	130	2026
30	31,8	60	149,4	140	2712
31	33,7	61	156,4	150	3571
32	37,7	63	171,4	160	4636
33	37,7	64	179,3		

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПСИХОМЕТРИЧЕСКИЙ ГРАФИК



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЗОВ, СОДЕРЖАЩИХ ВОДЯНЫЕ ПАРЫ И СВЯЗЬ МЕЖДУ НИМИ	3
2. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГАЗА.....	6
2.1. Абсолютный весовой метод	6
2.2. Конденсационный (гравиметрический) метод	8
2.3. Психрометрический метод	11
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	15
Работа № 1 «Определение влажности воздуха весовым методом»	15
Работа № 2 «Определение влажности воздуха психрометрическим методом»	17
ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ, ВЫНОСИМЫХ НА КОЛЛОКВИУМ	20
ПРИМЕРЫ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОГО КОЛЛОКВИУМА	21
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	24
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Давление водяных паров в зависимости от температуры.....	25
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Психометрический график.....	26



Ю.А. Горбатенко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Екатеринбург
2021