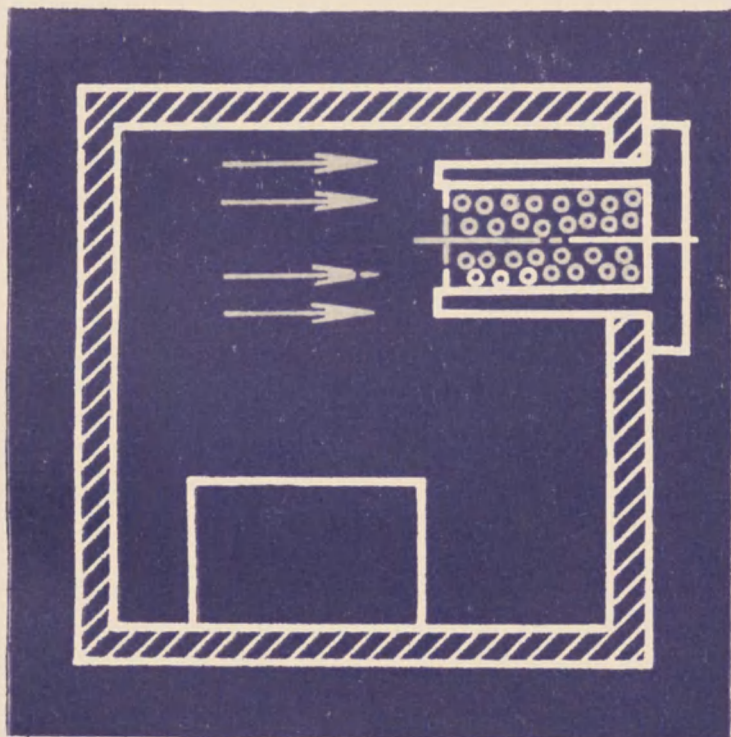




БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



Н.И. ИГУМНОВ

ВЛАГООБМЕН В ПРИБОРАХ И АППАРАТАХ



БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



Н.И. ИГУМНОВ

ВЛАГООБМЕН В ПРИБОРАХ И АППАРАТАХ

МОСКВА « МАШИНОСТРОЕНИЕ » 1989



Scan AAW

ББК 34.9-02

И28

УДК 697.93

Рецензент д-р техн. наук В. А. Шполянский

Игумнов Н. И.

И28 Влагообмен в приборах и аппаратах. — М.: Машиностроение, 1989. — 136 с.: ил. — (Б-ка приборостроителя).

ISBN 5-217-00068-6

Рассмотрена теория процессов влагообмена элементов аппаратуры с окружающим их воздухом. Приведены методики и примеры инженерного расчета технических устройств и систем, регулирующих этот влагообмен в приборах и аппаратах. Дано количественное описание процесса перетекания воздуха через щели приборов в зависимости от степени их герметичности, действия температуры, атмосферного давления, обдува ветром.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и исследованием приборов и автоматической аппаратуры с повышенными требованиями к влагообмену.

И $\frac{2706000000-612}{038(01)-89}$ КБ-13-88-89

ББК 34.9-02

ISBN 5-217-00068-6

© Издательство
«Машиностроение», 1989

Большинство современных машин имеет системы автоматического управления, элементная база которых состоит из электромеханических и радиоэлектронных приборов и аппаратов. Машины эти все шире применяются во многих отраслях народного хозяйства, в науке и культуре, условия их эксплуатации становятся все более разнообразными, а требования к надежности — все более высокими.

Нормальная работа таких машин в сложных условиях эксплуатации, в том числе в условиях повышенной влажности, может быть обеспечена только в том случае, если на стадиях проектирования и конструирования всех приборов и аппаратов, входящих в машину, наряду с другими вопросами будет решен вопрос об обеспечении необходимого влажностного режима каждого прибора и аппарата.

Интенсификация процесса создания новой техники требует применения научно обоснованных инженерных методов расчета различных процессов, в том числе и процессов влагообмена.

В книге рассмотрена теория ряда стационарных и нестационарных процессов влагообмена в приборах и аппаратах и приведены инженерные методики расчета технических устройств, обеспечивающих этот влагообмен.

Поскольку теория процессов влагообмена к настоящему времени разработана еще недостаточно и окончательно не сформировалась, автор при изложении вопросов теории и методики расчета устройств считал необходимым подробно указывать исходные положения и принимаемые допущения; по этой же причине приходилось в разных местах работы повторять эти исходные положения и допущения.

Приведенные в работе методики инженерного расчета устройств и систем регулирования влажности воздуха дают возможность на стадии проектирования рассчитывать эти устройства и системы; их применение позволит обеспечить активную защиту приборов и аппаратов от воздействия влажного воздуха.

Использование таких активных систем регулирования влажности совместно с широко применяемыми в настоящее время пассивными способами влагозащиты (антикоррозийные покрытия, пропитка и покрытие лаками и красками, заливка компаундами) позволит существенно повысить надежность машин, обеспечит их постоянную готовность к работе и полностью исключит работы по консервации и расконсервации машин при их хранении.

ГЛАВА 1.

ВОЗДУХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

1.1. СОСТАВ

Чистый сухой атмосферный воздух на уровне моря представляет собой смесь газов, состоящую в основном из азота и кислорода (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Состав чистого сухого воздуха [5]

Составная часть	Объем, %	Составная часть	Объем, %
Азот	78	Неон	10^{-3}
Кислород	21	Гелий	$4 \cdot 10^{-4}$
Аргон	0,95	Криптон	$5 \cdot 10^{-6}$
Углекислый газ	0,03	Ксенон	$6 \cdot 10^{-7}$

Однако собственно чистого сухого воздуха в природе нет, в нем всегда есть водяные пары и твердые частицы — пыль. Количество водяных паров по объему изменяется в широких пределах — от 4% в тропиках до 1% в средних широтах и 0,01% в холодных зонах в зимнее время. Вопрос о влажности воздуха рассмотрен подробно ниже, в 1.5.

1.2. ТЕМПЕРАТУРА

Температура воздуха является одной из основных характеристик каждой климатической зоны.

Средние суточная, месячная, годовая температуры воздуха у поверхности Земли и ее ход зависят прежде всего от радиационного баланса, т. е. от баланса приходящей и уходящей радиации на земной поверхности [1].

С точки зрения рассматриваемой проблемы регулирования влажности нас интересуют такие параметры, как средняя температура (месячная, годовая) и в особенности суточный ход температуры.

Суточный ход температуры, т. е. изменение температуры воздуха в течение суток, определяется, как было указано выше, балансом радиации на земной поверхности. Суточный максимум температуры

воздуха наступает несколько позже максимума приходящей радиации от Солнца; практически этот максимум температуры воздуха наступает между 14 и 15 ч местного времени, причем летом максимум смещается на более позднее послеполуденное время больше, чем зимой [1].

Минимум температуры наступает в конце ночи (при восходе Солнца) или же немного позже. Разность между максимальной и минимальной температурами называется амплитудой и является одним из характерных параметров каждой климатической зоны. Между точками минимума и максимума температура в среднем в течение суток изменяется плавно.

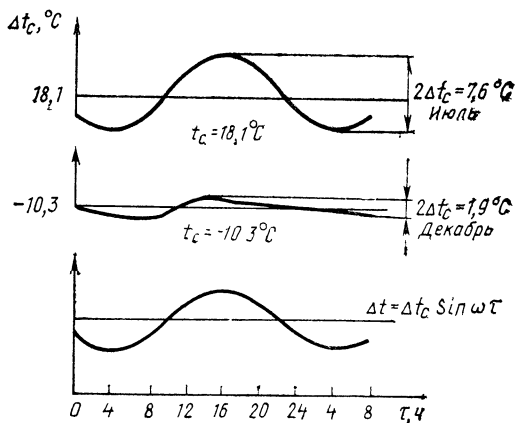


Рис. 1.1. Суточный ход температуры воздуха

График (рис. 1.1) среднего суточного хода температуры для средней широты (Москва) приближается к синусоиде с периодом в одни сутки. Далее в технических расчетах функция температуры воздуха в течение суток принята в виде суммы постоянной средней температуры t_c и синусоидальной переменной с периодом в одни сутки, т. е.

$$t = t_c + \Delta t_c \sin \omega \tau; \quad (1.1)$$

$$\Delta t = \Delta t_c \sin \omega \tau,$$

где t — температура воздуха в момент времени τ , °C; t_c — средняя суточная температура, °C; Δt_c — амплитуда синусоидального изменения температуры, °C; $2\Delta t_c$ — суточная амплитуда, равная разности максимальной и минимальной температур за сутки, °C (эта величина приводится в информации о погоде); $\omega = 7,27 \cdot 10^{-5}$ рад/с — угловая скорость изменения температуры; τ — текущее

Таблица 1.2

Средние температура и скорость ветра

Географический пункт	Параметры	Средние месячные показатели												Средние годовые показатели
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Москва	$t_c, ^\circ\text{C}$	-10,3	-9,6	-4,8	4,0	11,6	15,6	18,1	16,2	10,6	4,2	-2,2	7,6	3,8
	$\Delta t_c, ^\circ\text{C}$	1,0	1,9	2,9	3,3	3,9	4,0	3,8	3,6	3,0	1,6	1,0	0,6	2,6
	$v, \text{м/с}$	3,0	3,1	2,9	2,6	2,6	2,4	2,3	2,1	2,4	2,8	3,0	3,1	2,7
Таллинн	$t_c, ^\circ\text{C}$	-4,7	-5,5	-2,7	2,6	8,4	13,2	16,6	15,6	11,4	6,0	1,2	-2,6	5,0
	$\Delta t_c, ^\circ\text{C}$	0,4	1,1	2,1	2,4	2,4	2,5	2,6	2,6	2,2	1,3	0,6	0,3	1,7
	$v, \text{м/с}$	6,3	5,4	5,3	2,4	5,1	5,0	4,8	4,7	5,0	5,9	6,3	6,4	5,5
Багуми	$t_c, ^\circ\text{C}$	6,2	6,5	8,3	11,5	15,7	19,6	22,2	22,6	19,7	16,1	12,0	8,4	14,1
	$\Delta t_c, ^\circ\text{C}$	2,0	2,1	2,4	2,4	2,6	2,7	2,5	2,5	2,7	3,0	2,5	2,5	2,5
	$v, \text{м/с}$	2,6	2,7	2,6	2,3	2,1	2,0	1,8	1,7	1,6	1,8	1,9	2,2	2,1
Ташкент	$t_c, ^\circ\text{C}$	-0,9	2,0	7,6	14,4	20,0	24,7	26,9	24,9	19,4	12,6	6,4	1,6	13,3
	$\Delta t_c, ^\circ\text{C}$	2,7	3,3	3,8	4,6	5,7	6,5	7,1	7,4	7,3	5,8	4,2	2,8	5,1
	$v, \text{м/с}$	2,0	2,1	2,3	2,1	2,0	1,9	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,9
Якутск	$t_c, ^\circ\text{C}$	-43,1	-36,0	-22,2	-7,5	5,7	15,4	18,8	14,8	6,1	-7,9	-28,1	-39,7	-10,3
	$\Delta t_c, ^\circ\text{C}$	1,4	3,5	6,0	5,6	4,5	5,4	5,2	5,2	4,3	2,7	1,7	1,1	3,9
	$v, \text{м/с}$	1,4	1,4	2,0	2,8	3,4	3,3	3,0	2,8	2,6	2,6	2,0	1,3	2,4

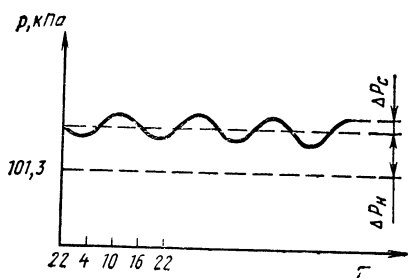


Рис. 1.2. Суточный ход атмосферного давления

время, с; за ноль отсчета для синусоиды принимается 8 ч местного времени, тогда максимум температуры будет в 14 ч местного времени.

Значения среднемесячной и среднегодовой температур t_c и амплитуды

значения синусоидального изменения температуры Δt_c для характерных географических пунктов СССР приведены в табл. 1.2.

1.3. АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Атмосферное давление создается столбом воздуха, находящегося в данном месте. Поскольку плотность воздуха зависит от температуры, то и атмосферное давление также зависит от температуры воздуха. Характер этой связи давления с температурой таков [1], что давление воздуха имеет непериодические изменения, связанные с изменением погоды, и периодические изменения в течение суток, т. е. суточный ход атмосферного давления.

Непериодические изменения атмосферного давления вследствие изменений погоды составляют не более $\pm 7\%$ среднего значения давления и только при тропических бурях достигают 10% [5].

Периодические изменения давления имеют суточный ход и представляют собой два колебания в течение суток (для лета максимумы в 10 и 22 ч местного времени и минимумы в 4 и 16 ч); амплитуда колебания около 300...400 Па [1].

Можно считать, что суточный ход атмосферного давления воздуха представляет собой синусоиду с периодом, равным 12 ч, и амплитудой, равной 150...200 Па; максимумы давления в 10 и 22 ч, минимумы — в 4 и 16 ч. На графике (рис. 1.2) суточного хода атмосферного давления фактическое давление p в любой момент времени представлено суммой постоянного давления p_0 , определяемого высотой данного места над уровнем моря, непериодического изменения Δp_n и периодического изменения Δp_c давления;

$$p = p_0 + \Delta p_n + \Delta p_c; \quad (1.2)$$

$$\Delta p_c = \Delta p_{c0} \sin \omega_1 \tau, \quad (1.3)$$

где $\Delta p_{c0} = 150 \dots 200$ Па; $\omega_1 = 14,54 \cdot 10^{-5}$ рад/с — угловая скорость суточного хода давления; τ — текущее время, с (за ноль от-

счета принято 7 ч местного времени); Δp_n — непериодическое изменение давления, Па; его можно считать скачкообразным; значение его не более $\pm 7\%$, т. е. не более ± 7 кПа на уровне моря.

1.4. ВЕТЕР

Воздух в свободной атмосфере имеет преимущественно горизонтальное движение. Это движение вызывается разностью давлений в слоях воздуха одинаковой высоты, а горизонтальный градиент давления, направленный в сторону убывания давления, и является силой, вызывающей перемещение массы воздуха [1].

Сила ветра характеризуется его скоростью. Скорость и направление ветра в конечном счете определяются изменением температуры воздуха и являются одной из основных климатических характеристик данной местности.

Принято силу ветра характеризовать средними месячной и годовой скоростями v (см. табл. 1.2).

Как следует из табл. 1.2, для каждого географического пункта средняя скорость ветра зависит от времени года. Что касается суточного хода скорости ветра, то этот ход в определенной мере повторяет суточный ход температуры, а именно: скорость ветра увеличивается к полудню и падает в ночное время.

1.5. ВЛАЖНОСТЬ

В состав воздуха входят водяные пары, которые и создают его влажность. Хотя доля водяных паров в общей массе воздуха и невелика (от долей до единиц процента по массе), однако и такое небольшое относительное количество водяных паров в общей смеси воздуха как газа придает влажному воздуху особые свойства.

Смесь паров воды и сухого атмосферного воздуха в области нормальных давлений и в интервале температур $-50 \dots +100$ °C обычно рассматривают как смесь идеальных газов, которая подчиняется уравнению состояния Менделеева — Клапейрона и закону Дальтона.

Для характеристики количества водяных паров во влажном воздухе используют следующие параметры: абсолютную влажность A , влажность насыщения A , относительную влажность ϕ , парциальное давление водяного пара p_n и максимальное парциальное давление (давление насыщения) водяного пара $p_{n,m}$.

Количество водяных паров, насыщающих воздух при нормальном атмосферном давлении, зависит от температуры; в табл. 1.3 [1] указаны давление насыщения водяного пара $p_{n,m}$ и влажность насыщения A в интервале температур $-50 \dots +60$ °C.

Т а б л и ц а 1.3

Давление и влажность насыщения водяного пара

t, °C	p _{п.м} , 10 ² Па	A, г/м ³	t, °C	p _{п.м} , 10 ² Па	A, г/м ³
+60	199,3	133	0	6,1	4,23
+50	123,4	84,5	—10	2,59	2,13
+40	73,8	52,2	—20	1,03	0,886
+30	42,4	30,9	—30	0,38	0,346
+20	23,4	17,6	—40	0,128	0,122
+10	12,3	9,6	—50	0,0394	0,039

Давление насыщения водяного пара $p_{п.м}$ и соответственно влажность насыщения A при температурах ниже нуля несколько различаются для условий насыщения водяного пара в равновесии со льдом и в равновесии с переохлажденной водой; однако это различие невелико и в технических расчетах его можно не учитывать; в табл. 1.3 и далее значения $p_{п.м}$ и A при температурах ниже нуля указаны для случая равновесия водяного пара со льдом.

Если водяной пар при данной температуре t не насыщает влажный воздух, то в этом случае его абсолютная влажность $a < A$ и парциальное давление $p < p_{п.м}$; величины a , p и t связаны между собой зависимостью [20]

$$a = \frac{0,81 \cdot 10^{-2} p_{п}}{1 + \beta t}, \quad (1.4)$$

где a — абсолютная влажность воздуха, г/м³, т. е. масса водяного пара в 1 м³ влажного воздуха; $p_{п}$ — парциальное давление пара, Па; $\beta = 1/273$ °C⁻¹ — температурный коэффициент объемного расширения; t — температура влажного воздуха, °C.

Отношение абсолютной влажности a к влажности насыщения A при данной температуре t определяет относительную влажность φ , %:

$$\varphi = \frac{a}{A} \cdot 100 = \frac{p_{п}}{p_{п.м}} \cdot 100. \quad (1.5)$$

Графики $a(t)$ при $\varphi = \text{const}$, или так называемая психрометрическая диаграмма, приведены на рис. 1.3.

Графические зависимости между a , φ и t наглядно показывают качественную сторону процессов во влажном воздухе и могут использоваться для количественной оценки этих процессов.

Однако для анализа процессов изменения влажности необходи-

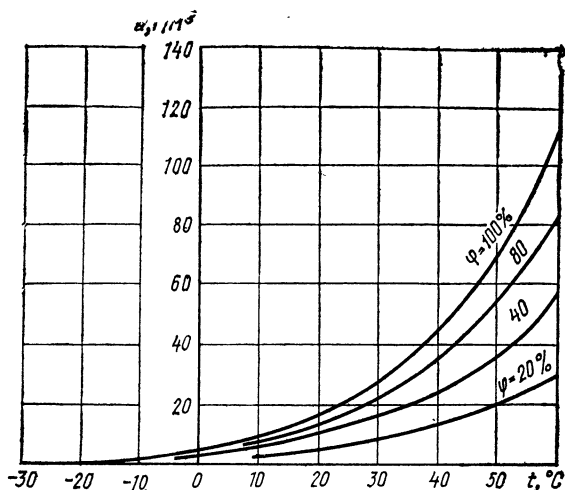


Рис. 1.3. Психрометрическая диаграмма
мы аналитические зависимости между величинами a , A , φ и T , где $T=273+t$. Теоретической основой этих зависимостей является уравнение Клаузиуса — Клапейрона [23]

$$\frac{dp}{dT} = \frac{1}{T^2} \frac{\lambda p}{R_p} \quad (1.6)$$

и его интеграл

$$p_{п.м} = p_{0п.м} e^{\frac{\lambda}{R_p} \frac{T-T_0}{TT_0}} \quad (1.7)$$

где $p_{п.м}$, $p_{0п.м}$ — давления насыщения водяного пара, Па, соответственно при температурах T и T_0 ; λ — удельная теплота парообразования воды, Дж/кг; T , T_0 — температура влажного воздуха (водяного пара), К; $R_p = 461,6$ Дж/(кг·К) — газовая постоянная водяного пара.

Из уравнения (1.7) получим

$$A_1 = p_{п.м} / (R_p T), \quad (1.8)$$

где A_1 — абсолютная влажность насыщения воздуха при температуре T , кг/м³.

Для практических расчетов уравнения (1.7) и (1.8) неудобны, к тому же они дают значительную погрешность при увеличении интервала температур $T-T_0$, так как λ зависит от температуры. Поэтому

имеется ряд эмпирических формул, связывающих между собой величины A и t .

Наиболее подходящей для интервала температур $0 \dots +45^\circ \text{C}$ является эмпирическая формула

$$A \approx 0,15 \left(\frac{t+30}{10} \right)^3, \quad (1.9)$$

где A — абсолютная влажность насыщения воздуха при нормальном атмосферном давлении, г/м^3 ; t — температура влажного воздуха, $^\circ \text{C}$.

В интервале температур $0 \dots +45^\circ \text{C}$ погрешность определения A по уравнению (1.9) не превышает $\pm 6\%$, что вполне приемлемо для технических расчетов.

Из уравнений (1.5) и (1.9) получим

$$a = 0,15 \cdot 10^{-2} \varphi \left(\frac{t+30}{10} \right)^3. \quad (1.10)$$

Уравнения (1.9) и (1.10) дают возможность аналитически просто и удобно описывать процессы изменения влажности, что и используется ниже; при этом следует только учитывать, что эти уравнения справедливы для интервала температур $0 \dots +45^\circ \text{C}$.

Изменение влажности воздуха ведет к изменению его плотности; анализ показывает, что в нормальных условиях эта зависимость плотности от влажности описывается уравнением

$$\rho_v = \frac{1}{T} (353 - 1,32 \cdot 10^{-5} p_{\text{н.м}}), \quad (1.11)$$

где $p_{\text{н.м}}$ — парциальное давление насыщения водяных паров, Па, при температуре T ; ρ_v — плотность влажного воздуха, кг/м^3 .

Как следует из уравнения (1.11), изменение φ ведет к небольшому (доли процента) изменению плотности влажного воздуха, но и этого небольшого изменения достаточно, чтобы в поле силы тяжести из общей массы влажного воздуха более влажные слои всплывали вверх, а менее влажные слои опускались вниз.

Влажность воздуха (табл. 1.4) является одной из определяющих характеристик климата.

Таблица 1.4

Влажность воздуха характерных географических пунктов СССР

Географический пункт	Средняя месячная относительная влажность воздуха φ , %												Средняя годовая относительная влажность, %
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Москва	86	83	82	70	64	66	70	74	79	82	85	87	77
Таллинн	86	85	80	78	74	77	80	82	84	84	87	87	82
Батуми	74	77	80	80	81	78	78	80	82	83	80	73	79
Ташкент	73	70	68	60	55	44	40	44	46	57	67	76	58
Якутск	73	73	68	59	53	55	59	66	70	77	77	74	67

ДЕЙСТВИЕ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА НА АППАРАТУРУ

2.1. ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ ГАЗ — ТВЕРДОЕ ТЕЛО

Известно, что многие свойства приборов зависят от влажности элементов, составляющих эти приборы. При этом влага в каждом элементе в общем случае может присутствовать в газообразном, жидком или твердом состоянии и находиться как на поверхности элемента, так и в его объеме. Количество и фазовое состояние влаги в элементе (пар, вода, лед) зависят от влажности, температуры и давления окружающего их влажного воздуха, а также от времени контакта влажного воздуха с элементом.

Известно, что наибольшее ухудшение свойств элементов оказывает жидкая фаза — вода. Поэтому важно установить условия образования, существования и развития пленки влаги на поверхности твердого тела, контактирующего при нормальном давлении с влажным воздухом, который имеет известные значения относительной влажности ϕ и температуры T .

В соответствии с существующими физическими представлениями любое твердое тело, контактирующее с газом, поглощает его из окружающей среды (сорбция) или отдает обратно (десорбция).

В случае контакта твердого тела с влажным воздухом, представляющим собой смесь газов, на поверхности тела из этой смеси адсорбируются преимущественно пары воды. Это объясняется тем, что вода имеет наиболее высокую температуру кипения при нормальном атмосферном давлении (температура кипения, т. е. температура фазового перехода жидкость — газ для воды составляет плюс 100°C , а для сухого воздуха — минус 194°C), поэтому в области рассматриваемых нами температур $-50 \dots +50^{\circ}\text{C}$ вода устойчиво существует в твердой и жидкой фазах, а все другие составные части воздуха устойчиво существуют только в газообразной фазе.

Адсорбированные (поглощенные поверхностью) частицы пара образуют на поверхности сорбента (основного материала) слои, которые уплотняются под действием сил молекулярного притяжения, нарастают при некоторой влажности воздуха и переходят в капельки жидкости. Если в теле сорбента имеются капиллярные и крупные поры, зазоры и трещины, сообщающиеся с поверхностью сорбента, то по ним адсорбированные частицы или капельки воды проникают

внутри тела и таким образом происходит абсорбция (поглощение объемом).

Интенсивность процессов адсорбции и абсорбции резко возрастает, если поглощающая поверхность материала имеет развитую микроструктуру и вода смачивает материал. В этом случае адсорбированная пленка воды покрывает почти непрерывно всю поверхность на границе воздух — твердое тело и попадает в капилляры и поры, в которых в результате эффекта смачивания вода подвергается большому дополнительному давлению за счет сил поверхностного натяжения; такое дополнительное давление существенно увеличивает проникновение воды внутрь пористых материалов.

Такова качественная картина образования и развития пленки воды на поверхности и проникновения влаги внутрь твердого тела, контактирующего с влажным воздухом. Для получения количественных характеристик рассматриваемых процессов необходимо знать следующее:

минимальную относительную влажность воздуха, при которой начинается образование пленки воды;

время установления равновесия между влажностью воздуха и пленкой влаги на поверхности.

По теории мономолекулярной адсорбции Ленгмюра [25], мономолекулярная пленка начнет образовываться тогда, когда скорость конденсации молекул на поверхности будет больше скорости испарения молекул с поверхности. Такую мономолекулярную пленку влаги, образующуюся на поверхности твердого тела, можно считать началом процесса образования жидкой фазы — воды из воздуха, имеющего некоторую, очень малую относительную влажность φ . По мере увеличения φ эта пленка должна при прочих равных условиях утолщаться, и при $\varphi \approx 100\%$, т. е. при давлении паров воды, равном давлению насыщения, на поверхности твердого тела должна устойчиво существовать достаточно толстая пленка воды, находящаяся в термодинамическом равновесии с влажным воздухом.

Для оценки значения минимальной относительной влажности воздуха φ_{\min} , при которой должно начаться образование мономолекулярной пленки, рассмотрим скорость конденсации молекул и скорость их испарения. Указанные скорости следующим образом зависят от физических условий [25]:

$$\mu = \frac{N_{AP}}{792 \sqrt{MRT}}; \quad (2.1)$$

$$v = v_0 e^{-\Delta H/(RT)}, \quad (2.2)$$

где μ — скорость конденсации, определяемая как число молекул, ударяющихся об 1 см^2 плоской поверхности тела в секунду, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$;

считая, что при ударе адсорбирующаяся молекула «прилипает» к поверхности, т. е., принимая коэффициент accommodation равным единице, получим, что μ есть число молекул, конденсирующихся на 1 см^2 плоской поверхности тела в секунду; ν — скорость испарения, т. е. число испаряющихся молекул с 1 см^2 плоской поверхности тела в секунду, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$; $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ — число Авогадро; p — давление водяного пара, Па; $M = 18 \text{ г/моль}$ — молекулярная масса воды; $R = 8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ — универсальная газовая постоянная; ν_0 — число молекул воды в сплошном монослое на 1 см^2 поверхности, см^{-2} ; ΔH — теплота адсорбции, Дж/моль; при полном заполнении монослоя теплота адсорбции становится близкой к теплоте конденсации [27].

Рассмотрим порядок величин μ и ν при нормальных условиях. Имеется влажный воздух температурой $T = 293 \text{ К}$ и относительной влажностью $\varphi = 60\%$ ($p = 1,4 \text{ кПа}$); вычислим μ :

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{N_A p}{792 \sqrt{MRT}} = \\ &= \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,4 \cdot 10^3}{792 \sqrt{18 \cdot 8,314 \cdot 293}} \approx 5 \cdot 10^{21}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Вычислим ν :

$$\nu = \nu_0 e^{-\Delta H/(RT)} = 0,87 \cdot 10^{15} e^{-\frac{40600}{8,314 \cdot 293}} \approx 5 \cdot 10^7. \quad (2.4)$$

При вычислении ν величину ν_0 приняли равной $0,87 \cdot 10^{15}$, имея в виду, что площадь, занимаемая одной молекулой воды в монослое, составляет $11,5 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ [14], а значение ΔH приняли равным значению теплоты конденсации воды, т. е. равным $40\,600 \text{ Дж/моль}$.

Таким образом, сравнивая значения μ и ν , видим, что $\mu \gg \nu$, т. е. при контакте твердого тела с влажным воздухом на поверхности твердого тела обязательно возникает пленка влаги, так как скорость конденсации влаги μ на много порядков превосходит скорость испарения ν . Из анализа выражений (2.1) — (2.4) следует, что для интервала температур $-50 \dots +50 \text{ }^\circ\text{С}$ значения μ будут на много порядков превосходить не только значения ν , но и значение $\nu_0 = 0,87 \cdot 10^{15}$. Это означает, что в рабочем интервале температур при контакте твердых тел с влажным воздухом, имеющим даже очень малую относительную влажность, на поверхности твердого тела будет образовываться, по крайней мере, мономолекулярная пленка влаги.

По мере увеличения влажности воздуха толщина пленки на поверхности должна увеличиваться до некоторого значения, при котором наступает динамическое равновесие.

Динамика изменения толщины пленки при изменении влажности

воздуха может быть в первом приближении количественно описана тем же уравнением, что и динамика сорбции мономолекулярной пленки [25]:

$$\frac{\delta_{\infty} - \delta}{\delta_{\infty} - \delta_n} = e^{-\tau/W_n}, \quad (2.5)$$

где δ_{∞} , δ_n , δ — соответственно установившаяся, начальная и рассматриваемая в момент времени τ толщина пленки, мкм; W_n — постоянная времени образования пленки влаги на поверхности тела, с;

$$W_n = \frac{v_0}{\mu + v} \approx \frac{v_0}{\mu}. \quad (2.6)$$

Поскольку величина v_0 для воды имеет значение порядка $1 \cdot 10^{15}$ [14], а величина μ в рабочих интервалах температур ($-50 \dots +50^\circ \text{C}$) и относительных влажностей имеет значение $10^{19} \dots 10^{22}$, то постоянная времени образования пленки влаги W_n , вычисленная по формуле (2.6), будет иметь значение порядка $10^{-4} \dots 10^{-7}$ с.

Из уравнения (2.5) следует, что время установления динамического равновесия пленки по толщине составляет $(3 \dots 4) W_n$, отсюда получим важный для практики вывод о том, что пленка влаги на твердом теле при контакте последнего с влажным воздухом возникает и достигает установившегося значения за время $10^{-4} \dots 10^{-7}$ с, или практически мгновенно.

Пока нет опубликованных работ, в которых были бы приведены обобщенные аналитические зависимости между толщиной пленки влаги на поверхности материала, влажностью окружающего воздуха, временем контакта и свойствами поверхности (смачиваемость, шероховатость); в литературе имеются лишь отдельные опытные данные по некоторым материалам. Так, в работе [17] М. М. Михайловым приведены сведения о толщине пленки влаги на поверхности стекла (рис. 2.1). На рис. 2.1 видно, что при $\varphi \leq 30\%$ пленка влаги на стекле (хорошо смачиваемый материал) практически отсутствует, а резкий рост толщины пленки происходит при $\varphi > 90\%$.

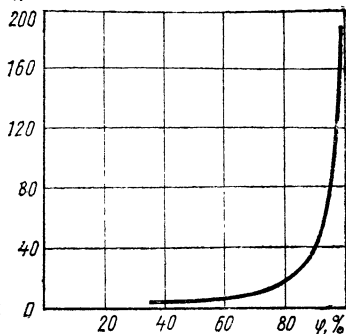
Здесь следует заметить, что, по утверждению У. Стила [21], пленка влаги толщиной уже в три молекулярных слоя практически обладает всеми свойствами жидкости, т. е. воды.

Таким образом, рассмотренные выше физические процессы образования пленки влаги на поверхности твердого тела, окруженного влажным воздухом, позволяют сделать следующие выводы:

тонкая пленка влаги возникает на поверхности даже при очень низкой относительной влажности (порядка единиц процентов);

по мере увеличения относительной влажности эта пленка утолщается;

Рис. 2.1. Толщина пленки влаги n (число молекулярных слоев) на стекле во влажном воздухе при 20 °С



динамическое равновесие между пленкой и окружающим влажным воздухом (при отсутствии проникновения влаги с поверхности внутрь тела) устанавливается практически мгновенно;

при некоторой толщине пленки и продолжительности действия свойства твердого тела (поверхностные и объемные) определяются в значительной мере свойствами влаги.

Для решения вопроса о допустимом уровне относительной влажности воздуха, при котором пленка влаги еще не оказывает ухудшающего действия на эксплуатационные свойства элементов, необходимо рассмотреть действие влаги на элементы аппаратуры.

2.2. ДЕЙСТВИЕ ВЛАГИ НА ЭЛЕМЕНТЫ АППАРАТУРЫ

Влага, находясь в виде пленки на поверхности элементов аппаратуры, существенно понижает надежность работы аппаратуры в целом.

С точки зрения отрицательного воздействия влаги на элементы рассмотрим:

действие влаги на электроизоляционные части элементов,

действие влаги на металлические части элементов,

наличие влаги как необходимое условие для возникновения и развития плесневых грибов.

Действие влаги на электроизоляционные части элементов заключается в уменьшении удельного поверхностного сопротивления ρ_s , удельного объемного сопротивления ρ_v и электрической прочности изоляции, в увеличении собственной емкости конструкций типа катушек вследствие изменения их эффективной диэлектрической проницаемости ϵ , увеличении тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, изменении геометрических размеров за счет набухания. Эти ухудшения электроизоляционных характеристик элементов вызваны тем, что при наличии влаги на элементах значения ρ_s , ρ_v и ϵ существенно отличаются от значений аналогичных величин «сухих» изоляторов.

Хотя сама чистая конденсационная вода и является сравнительно хорошим изолятором ($\rho_v \approx 2 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$), однако на поверхности и в объеме изоляционного материала у нее резко увеличивается электрическая проводимость и она становится в известной степени гровод-

ником, поскольку вместе с кислотными и щелочными остатками, всегда имеющимися как на поверхности, так и внутри изоляторов, и загрязнениями, адсорбированными поверхностью материала из воздуха (частицы SO_2 , CO_2 и т. д.), всегда превращается в электролит слабой концентрации, который и проводит ток. Некоторые изоляционные материалы содержат в своем составе воднорастворимые соединения; при попадании на них воды эти соединения частично переходят в воду, создавая ионы проводимости (например, щелочное стекло имеет в своем составе воднорастворимые Na_2O , CaO , MgO), что также существенно уменьшает сопротивление изоляции.

Степень снижения сопротивления изоляции (как ρ_s , так и ρ_v) при воздействии влаги зависит от толщины образующейся пленки влаги, степени загрязнения этой пленки проводящими включениями и степени проникновения влаги по всему объему изолятора. Поэтому снижение сопротивления изоляции в основном определяется свойствами поверхности материала (шероховатостью, степенью загрязнения), положением этой поверхности в поле действия сил тяжести (на вертикально расположенных поверхностях пленка влаги тоньше, чем на горизонтальных), временем выдержки во влажном воздухе. Именно поэтому в литературе редко приводятся конкретные количественные характеристики ρ_s и ρ_v материалов, находящихся под действием влаги, так как такие характеристики в большей мере являются свойствами поверхности и условиями ее увлажнения, чем свойствами самого материала; этим же объясняется и существенный разброс численных значений ρ_s и ρ_v , особенно ρ_s , приведенных в различных литературных источниках.

Известно, что утечка тока в изоляторе происходит по поверхности (так как $\rho_s < \infty$) и по объему (так как $\rho_v < \infty$), причем основную роль играет утечка по поверхности.

Количественное представление об уменьшении ρ_s изоляционных материалов при воздействии влаги дает рис. 2.2 [17].

Как видно на рис. 2.2, при действии влаги удельное сопротивление ρ_s уменьшается в 10—10 000 раз, что приводит к существенно му увеличению тока в изоляторе $I_{\text{из}}$.

Следовательно, делаем вывод, что электроизоляционные свойства элементов аппаратуры в определяющей мере обусловлены их фактической влажностью, т. е. наличием влаги на поверхности и в объеме элемента. В условиях эксплуатации непосредственно влажность самих элементов не измеряется; ее обычно приближенно оценивают по относительной влажности окружающего воздуха, предполагая при этом, что между элементами и окружающим воздухом установилось динамическое равновесие по влаге.

Поскольку влажность элементов обусловлена относительной влажностью окружающего воздуха, которую можно измерить и в оп-

Рис. 2.2. Графики $\rho_s = f(\varphi)$ при $t = 20^\circ\text{C}$:

1 — для парафина; 2 — для чистого кварца; 3 — для стекла; 4 — для загрязненного кварца

ределенной мере регулировать, введем понятие оптимальной по надежности относительной влажности воздуха. Это такая относительная влажность воздуха, при которой обеспечивается наибольшая надежность элементов в режиме их функционирования и хранения.

Для электроизоляционных частей элементов оптимальными по надежности значениями относительной влажности воздуха можно считать 30...60%; это подтверждено результатами ряда теоретических исследований и практикой эксплуатации многочисленных конструкций [4, 5, 26]. Границы этого интервала оптимальной относительной влажности выбраны по следующим соображениям:

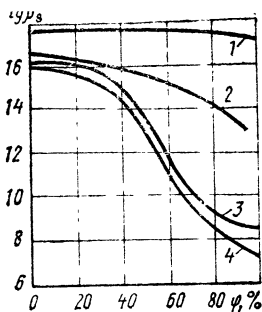
при $\varphi > 60\%$ на поверхностях элементов образуется пленка влаги, которая снижает ρ_s тем больше, чем выше φ ;

при $\varphi < 30\%$ происходит интенсивное осушение органических изоляционных материалов по объему; из них выделяется не только влага, находящаяся в капиллярах, но и структурно связанная влага, что приводит к потере эластичности, уменьшению механической прочности этих материалов; при длительном (свыше 3 мес) пребывании в такой среде органические изоляционные материалы становятся хрупкими, теряют эластичность, на них появляются поверхностные трещины.

Действие влаги на металлические части элементов. Появление влаги на металлической части любого элемента неизбежно влечет за собой появление электрохимической коррозии металлов, контактирующих с этой влагой. По существующим представлениям, имеется два вида коррозии металлов: газовая (химическая) и электрохимическая [5, 18].

С термодинамической точки зрения коррозия благородных металлов должна быть всегда, так как процесс идет самопроизвольно с выделением энергии и приводит корродирующий металл в более стабильное, естественное для него состояние — химическое соединение в виде окислов, карбонатов, сульфидов и т. п. Однако скорость этого процесса зависит от внешних условий, способствующих протеканию процесса коррозии или, наоборот, тормозящих его.

В чистом виде газовая коррозия представляет собой процесс окисления металла кислородом воздуха в отсутствие воды (в жидкой фазе). Эти процессы чисто газовой коррозии могут происходить в



воздухе, имеющем такую относительную влажность, при которой на контактирующих с ним твердых телах не образуется пленка влаги ($\phi < 55\%$); в рассматриваемой нами аппаратуре относительная влажность воздуха $\phi < 55\%$ может быть только либо при осушении, либо при подогреве воздуха.

Скорость чисто газовой коррозии всех металлов, в том числе и неблагородных, очень мала (в 100—1000 раз меньше скорости электрохимической коррозии), поэтому практически этот вид коррозии не оказывает сколько-либо заметного воздействия на свойства элементов аппаратуры и обычно не учитывается.

Электрохимическая коррозия представляет собой процесс растворения металла в окружающем его электролите; в данном случае роль электролита выполняет пленка воды, находящаяся на металле. Электрохимическая коррозия наступает всегда, когда на металле или на комбинации контактирующих металлов появляется пленка влаги.

С целью кардинального решения вопроса защиты металлов от электрохимической коррозии необходимо исключить возможность появления пленки влаги на металлах в процессе эксплуатации. Для этого необходимо, чтобы окружающий металлы воздух имел относительную влажность $\phi < 60\%$; в этом случае пленка влаги на поверхности металла не образуется.

Условия для возникновения и развития плесневых грибов. Термином «плесневой гриб» обозначают нитевидные плетения (мицелии), состоящие из отдельных грибковых нитей; биологически плесневые грибы представляют собой малые грибы и грибы простого строения [5]. Отдельные грибковые нити имеют диаметр около 10 мкм, длину — несколько сантиметров; размножение плесневых грибов происходит спорами, размером порядка единиц микрометров; в атмосферном воздухе на высоте до 200 м всегда есть споры плесневых грибов.

Все технически важные плесневые грибы в процессе своего питания разлагают высокомолекулярные соединения естественного происхождения (целлюлоза, каучук, ткань), а также некоторые высокомолекулярные искусственные соединения (поливинилхлорид); разложение материалов происходит путем выделения грибом различных ферментов, катализирующих этот процесс.

Для развития плесневого гриба необходимы следующие условия: относительная влажность воздуха 65...100%, температура +5...+65 °С; неподвижный воздух, отсутствие прямого действия солнечных лучей, особенно ультрафиолетового излучения, питательная среда в виде указанных выше органических материалов. При наличии указанных условий споры начинают развиваться на увлажненной поверхности и образуют колонии нитей (мицелии); для этого достаточно 5—7 сут.

Развитие и существование плесневого гриба в качестве обязательного условия требует наличия пленки влаги на поверхности органического материала; эта влага необходима для контакта гриба с поверхностью материала, для питания самого гриба, для восполнения потерь влаги грибом за счет испарения; тело гриба — нить — сильно испаряет влагу даже в неподвижный воздух; при перемешивании (движении) воздуха испарение возрастает настолько, что нить отдает влаги больше, чем ее получает, гриб погибает; поэтому для развития гриба необходимо спокойное состояние воздуха.

Вредное воздействие плесневых грибов на приборы заключается в том, что и мицелии гриба, и продукты его жизнедеятельности, представляя собой электролит, резко ухудшают электроизоляционные свойства материалов, приводят даже к коротким замыканиям, вызывают электрохимическую коррозию металлов. Поэтому допускать рост и развитие плесневых грибов в приборах нельзя.

Для исключения возможности появления и развития плесневых грибов в приборах достаточно лишить их одного необходимого условия существования — пленки влаги. С этой целью необходимо поддерживать в приборе относительную влажность воздуха $\varphi < 65\%$.

2.3. ОПТИМАЛЬНАЯ ПО НАДЕЖНОСТИ ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Анализ рассмотренного выше материала дает возможность сделать следующие выводы.

1. Тонкая пленка влаги возникает на поверхности контактирующих с воздухом элементов уже при очень низкой относительной влажности воздуха φ (единицы процентов).

2. По мере роста φ увеличивается и толщина пленки влаги, находящаяся в динамическом равновесии с воздухом; время установления равновесия мало (порядка 10^{-3} с).

3. По мере изменения толщины пленки влаги ее присутствие начинает сказываться на свойствах элементов, от которых существенно зависит надежность их работы, а именно:

при $\varphi < 30\%$ органические изоляционные материалы ухудшают физико-механические свойства за счет пересыхания;

при $\varphi > 60\%$ существенно ухудшаются электроизоляционные свойства материалов;

при $\varphi > 60\%$ создаются условия для коррозии и происходит электрохимическая коррозия металлов;

при $\varphi > 65\%$ создаются условия для возникновения плесневых грибов и происходит их развитие.

4. Оптимальная по надежности относительная влажность воздуха должна быть такой, чтобы обеспечивались оптимальные условия работы для всех элементов прибора, состоящих из разнообразных ма-

териалов. Такой влажностью для прибора является относительная влажность 30...60% или, с некоторым запасом, 30...55%.

Эту относительную влажность воздуха 30...55% около и внутри прибора и должна обеспечивать соответствующая система регулирования влажности воздуха.

ВОЗДУХООБМЕН ПРИБОРА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ ЧЕРЕЗ ЩЕЛИ В ОБОЛОЧКЕ

3.1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

С целью уменьшения влияния окружающей среды на функционирование прибора, в том числе уменьшения влагообмена между средой внутри прибора и окружающей средой, прибор снабжается герметизирующей оболочкой. Эта оболочка у большинства приборов имеет щели и неплотности. При конструировании, изготовлении и эксплуатации таких приборов (кузовов, аппаратов, тарных ящиков, упаковок и т. п.) стараются указанные щели, неплотности сделать минимальными. Однако в силу конструктивных, технологических, экономических и организационных требований и ограничений полностью ликвидировать щели и неплотности не удастся, и эксплуатация такого прибора происходит в условиях непрерывного перетекания воздуха через эти щели из окружающей среды внутрь прибора и обратно.

Поскольку в общем случае влажность воздуха внутри прибора и в окружающей среде различна, то при перетекании воздуха через щели вместе с воздухообменом происходит и влагообмен внутреннего пространства прибора с окружающей средой, при этом воздухообмен количественно определяет и влагообмен.

Если герметизирующая оболочка прибора влагопроницаема через стенку (например, полиэтиленовая пленка), то при наличии щелей в такой оболочке одновременно происходит перенос влаги и при перетекании воздуха через щели, и при диффузии влаги через толщу оболочки; в случае полной герметизации перенос влаги происходит только посредством диффузии. Анализ этих процессов показывает, что при перетекании воздуха через щели переносимое им количество влаги в 5—10 раз превышает количество влаги, переносимое за счет диффузии, поэтому при совместном действии обоих процессов следует учитывать только первый из них.

В данной главе рассмотрен воздухообмен прибора с окружающей средой через щели в оболочке; вызываемый им влагообмен и влагообмен путем диффузии влаги через оболочку рассмотрены в гл. 4.

Далее для конкретности изложения процессы перетекания воздуха через щели в оболочке прибора рассмотрены на примере перете-

кания воздуха через щели кузова; однако полученные результаты применимы и для других видов приборов, что показано в 3.4.

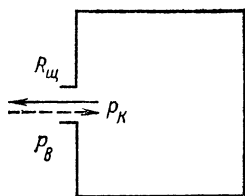
Обмен воздухом между окружающей средой и объемом внутри кузова происходит либо организованно через воздухопроводы, люки, двери — в режиме работы аппаратуры, либо неорганизованно через щели — в режиме хранения. Режим организованного воздухообмена, с точки зрения воздействия влаги воздуха, оказывает малое влияние на надежность работы аппаратуры, размещенной внутри кузова, поскольку при этом воздухообмене аппаратура обычно находится во включенном состоянии и, как показано в 5.2, вследствие самоподогрева или нагрева воздуха ее относительная влажность уменьшается до значения $\phi_{\text{опт}}$. Наибольшее отрицательное влияние на надежность аппаратуры оказывает неорганизованное перетекание воздуха из окружающей среды в кузов и обратно через щели, происходящее при выключенном состоянии аппаратуры, называемом режимом хранения.

3.2. ПЕРЕТЕКАНИЕ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ЩЕЛИ

Рассмотрим процессы перетекания воздуха через щели для получения количественных характеристик этого процесса; определим перетекающие объемы, перепады давления, их связь с герметичностью кузова и условиями хранения.

Причиной перетекания воздуха из окружающей среды в кузов и обратно является перепад давления Δp между давлением воздуха в кузове p_k и давлением наружного воздуха p_b . Этот перепад давления образуется вследствие изменения температуры воздуха T_k внутри кузова, изменения атмосферного давления p_b и действия ветра, если последний непосредственно обдувает кузов.

Физическая модель для расчета процессов перетекания воздуха следующая: кузов с размещенной в нем аппаратурой ограничен герметичной стенкой с некоторым количеством щелей, имеющих эквивалентное гидравлическое сопротивление $R_{щ}$ (рис. 3.1); используя принцип суперпозиции, для расчета можно принять, что все щели объединены в одну с тем же гидравлическим сопротивлением $R_{щ}$ (это правомерно, так как режим движения воздуха в щелях ламинарный — см. 3.3).



Такая физическая модель прибора (кузова) и процессы перетекания воздуха в нем были рассмотрены автором [11, 12]. Приборы подобного типа, в том числе кузова, названы нами квазигерметичными.

Рис. 3.1. Физическая модель кузова

Проанализируем перетекание воздуха через щели из-за изменения условий хранения.

Перетекание воздуха вследствие изменения его температуры внутри кузова. Изменение температуры воздуха T_k внутри кузова ведет к появлению перепада давлений Δp ; вызываемое этим перепадом перетекание воздуха уменьшает перепад давлений. Значение Δp может быть отрицательным или положительным, что вызывает течение воздуха или внутрь кузова, или из него.

Составим исходное дифференциальное уравнение перетекания воздуха через щели; для этого рассмотрим состояние воздуха в кузове:

$$pV = GRT. \quad (3.1)$$

В рассматриваемой задаче величины p , V и T переменны; обозначая начальные значения p , V и T соответственно через p_0 , V_0 и T_0 , получим из уравнения (3.1):

$$\Delta p + \frac{p_0}{V_0} \Delta V = \frac{p_0}{T_0} \Delta T, \quad (3.2)$$

где $\Delta p = p_k - p_v$ — разность давлений, Па, между средой внутри кузова и внешней средой, возникшая за время τ вследствие изменения температуры воздуха в кузове на величину ΔT ; ΔV — объем перетекшего воздуха за время τ , м³, при этом $+\Delta V$ — вытекание из кузова, так как уравнение (3.1) относится к воздуху кузова, $-\Delta V$ — натекание в кузов; $\Delta T = T_k - T_{k0}$ — изменение температуры воздуха в кузове за время τ , К.

Величины Δp , ΔV и ΔT являются функциями времени τ , для рассматриваемого случая независимой переменной является ΔT .

Объем ΔV перетекшего воздуха определим через Δp ; для ламинарного режима движения воздуха через щель с гидравлическим сопротивлением $R_{щ}$ на основе закона Пуазейля получим [15]

$$q = \Delta p / R_{щ}, \quad (3.3)$$

где q — объемный расход воздуха через щель, м³/с; $R_{щ}$ — гидравлическое сопротивление щели, кг/(м⁴·с).

Объем перетекшего за время τ воздуха

$$\Delta V = \int_0^{\tau} q d\tau = \frac{1}{R_{щ}} \int_0^{\tau} \Delta p d\tau. \quad (3.4)$$

Из выражений (3.2) и (3.4) получим

$$\frac{d\Delta p}{d\tau} + \frac{\Delta p}{N_n} = \frac{p_0}{T_0} \frac{d\Delta T}{d\tau}; \quad (3.5)$$

$$N_H = \frac{\dot{V}_0}{q} \frac{\Delta p}{p_0},$$

где N_H — постоянная времени натекания объема кузова через щель с сопротивлением $R_{щ}$, с.

Дифференциальное уравнение (3.5) является исходным; по нему при известных $\Delta T(\tau)$ для конкретных случаев хранения можно вычислить $\Delta p(\tau)$, а затем по уравнению (3.4) вычислить $\Delta V(\tau)$, т. е. определить перепад давления и объем перетекающего воздуха при изменении температуры.

Выше показано, что функция $\Delta T(\tau)$ — синусоида с периодом в 1 сут

$$\Delta T = \Delta T_c \sin \omega \tau, \quad (3.6)$$

где ΔT_c — амплитуда суточного колебания температуры воздуха кузова около ее среднесуточного значения $T_{к0}$, К; $\omega = 7,27 \cdot 10^{-5}$ рад/с — угловая скорость изменения температуры.

Дифференциальное уравнение (3.5) имеет решение:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2; \quad (3.7)$$

$$\Delta p_1 = C_1 e^{-\tau/N_H}; \quad (3.8)$$

$$\Delta p_2 = p_0 \frac{\Delta T_c}{T_{к0}} \frac{N_H \omega}{\sqrt{1 + N_H^2 \omega^2}} \cos(\omega \tau + \varphi); \quad (3.9)$$

$$\varphi = -\arctg N_H \omega. \quad (3.10)$$

Постоянная C_1 определяется начальными условиями: при $\tau = 0$ $\Delta T = 0$, следовательно, $\Delta p_1 = 0$ и $C_1 = 0$.

Таким образом, дифференциальное уравнение (3.5) имеет решение

$$\Delta p = p_0 \frac{\Delta T_c}{T_{к0}} \frac{N_H \omega}{\sqrt{1 + N_H^2 \omega^2}} \cos(\omega \tau + \varphi). \quad (3.11)$$

Зная $\Delta p(\tau)$, т. е. зная закон изменения перепада давления, определим объем перетекающего воздуха $\Delta V(\tau)$. Из уравнения (3.4) с учетом (3.11) получим

$$\Delta V = V_0 \frac{\Delta T_c}{T_{к0}} \frac{1}{\sqrt{1 + N_H^2 \omega^2}} \times \\ \times [\sin(\omega \tau + \varphi) - \sin \varphi]. \quad (3.12)$$

Полученные уравнения (3.11) и (3.12) описывают процесс перетекания воздуха между внутренним объемом кузова и окружающей средой при изменении температуры воздуха в кузове.

Из уравнений (3.11) и (3.12) следует, что, если кузов не имеет идеальной герметичности, т. е. если $R_{\text{ш}} < \infty$, $N_n < \infty$, кузов «дышит» с угловой скоростью ω изменения температуры, т. е. перепад давлений и перетекающий объем воздуха изменяются с угловой скоростью ω ; вопрос об объемах перетекающего воздуха рассмотрен подробнее в 3.4.

Перетекание воздуха вследствие изменения давления окружающей среды. Изменение давления окружающей среды (в данном случае — изменение атмосферного давления за время τ от начального значения p_0 до p_b) приводит к появлению перепада давления Δp , под действием которого и происходит перетекание воздуха.

Аналитическое описание процесса перетекания воздуха под действием изменения давления окружающей среды аналогично уравнениям (3.2) и (3.5), только в правой части уравнений должно быть Δp .

Выражение для давления p_b окружающей среды имеет вид (1.3); под действием этого давления происходит периодическое перетекание воздуха из окружающей среды в кузов и обратно; при этом параметры Δp и ΔV описываются уравнениями

$$\Delta p = -\Delta p_{c0} \frac{N_n \omega_1}{\sqrt{1 + N_n^2 \omega_1^2}} \cos(\omega_1 \tau + \gamma_1 + \varphi_1); \quad (3.13)$$

$$\Delta V = V_0 \frac{\Delta p_{c0}}{p_0} \frac{1}{\sqrt{1 + N_n^2 \omega_1^2}} \times \\ \times [\sin(\omega_1 \tau + \gamma_1 + \varphi_1) - \sin(\gamma_1 + \varphi_1)], \quad (3.14)$$

где γ_1 — фазовый сдвиг синусоиды атмосферного давления относительно синусоиды температуры кузова.

Из уравнений (3.13) и (3.14) следует, что, если кузов имеет щели, т. е. если $N_n < \infty$, кузов «дышит», т. е. через щели с угловой скоростью ω_1 изменения атмосферного давления происходит переменное перетекание воздуха; вопрос об объемах перетекающего воздуха рассмотрен подробнее в 3.4.

Перетекание воздуха вследствие действия ветра. Перетекание воздуха через щели кузова различно под действием постоянной и переменной составляющих скорости ветра. Непосредственный обдув кузова ветром приводит к тому, что постоянная составляющая скорости ветра вызывает эффект сквозняка, так как на наветренной стороне кузова создается избыток давления за счет торможения потока воздуха, на подветренной стороне — разрежение за счет обтекания потоком воздуха не идеальной в гидродинамическом отношении формы кузова; под действием этого постоянного перепада давления происходит непрерывное натекание воздуха в кузов через щели на наветренной стороне и такое же вытекание на подветренной стороне.

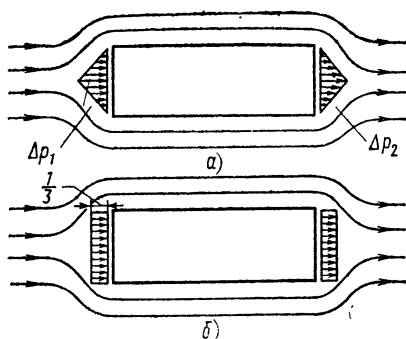


Рис. 3.2. Фактическое (а) и расчетное (б) распределение перепадов давлений на стенках прибора при обдуве ветром

Переменная составляющая скорости ветра создает с частотой флюктуаций ветра то избыток давления, то разрежение с обеих сторон кузова (с наветренной и подветренной сторон), что приводит к перетеканию

воздуха через щели кузова в обоих направлениях, т. е. в этом случае кузов «дышит» с частотой флюктуаций скорости ветра.

Выполненные исследования показывают, что объем воздуха, перетекающего через щели кузова под действием переменной составляющей скорости ветра, равен не более десятой доли объема, перетекающего под действием постоянной составляющей скорости ветра, поэтому далее учитывается действие только постоянной составляющей средней скорости ветра.

Суммарный перепад давлений в центре давления, вызываемый постоянной составляющей скорости ветра v , будет

$$\Delta p_{\text{вц}} = \Delta p_1 + (-\Delta p_2) = 1,8\Delta p_1, \quad (3.15)$$

где $\Delta p_1 = \rho v^2/2$ — в центре давления; $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха; $\Delta p_2 = -0,8\Delta p_1$ — в центре разрежения [15].

Считая обдуваемый кузов параллелепипедом и полагая, что поток воздуха направлен вдоль одной из его осей, а также принимая закон распределения давлений Δp_1 и Δp_2 на стенках кузова по треугольнику [15], как это показано на рис. 3.2, получим распределение давлений на наветренной стороне — пирамида с вершиной Δp_1 , на подветренной стороне — пирамида с вершиной Δp_2 .

Перепад давления Δp_v создает перетекание воздуха (сквозняк) с расходом q ; поскольку этот расход q через щели линейно зависит от Δp_v , можно распределение давлений на стенке по пирамиде заменить эквивалентным равномерным распределением; с учетом этого получим

$$\Delta p_v = \frac{1}{3} \cdot 1,8\Delta p_1 = \frac{0,6 \cdot 1,29v^2}{2} = 0,387v^2, \quad (3.16)$$

где Δp_v — расчетное значение перепада давления при действии скорости ветра, Па; v — средняя скорость ветра, м/с.

Перетекание воздуха при этом происходит в основном через щели в наветренной и подветренной стенках кузова, т. е. вдуваемый

наружный воздух проходит через щели на входной стороне, смешивается в кузове с воздухом кузова и выходит с подветренной стороны. Для оценки гидравлического сопротивления этого пути можно в первом приближении считать, что гидравлическое сопротивление щелей в каждой стенке, крыше и полу кузова одинаковое; при эквивалентном гидравлическом сопротивлении щелей кузова $R_{щ}$ гидравлическое сопротивление каждой из стенок, пола или крыши составит $6R_{щ}$, так как эквивалентное гидравлическое сопротивление кузова $R_{щ}$ представляет собой параллельное соединение названных элементов. Перетекание воздуха при действии Δp_v происходит последовательно через две стенки с суммарным сопротивлением $12R_{щ}$; при этом перетекающий объем

$$\begin{aligned} V_v &= \int_0^{\tau} q d\tau = \frac{1}{12R_{щ}} \int_0^{\tau} \Delta p_v d\tau = \\ &= \frac{V_0}{12p_0N_H} \int_0^{\tau} \Delta p_v d\tau. \end{aligned} \quad (3.17)$$

При постоянном значении средней скорости v перепад давлений Δp_v будет также постоянным; для этого случая получим из уравнений (3.17) и (3.16):

$$\begin{aligned} V_v &= \frac{\Delta p_v V_0 \tau}{12p_0N_H} = \frac{0,387v^2 V_0 \tau}{12 \cdot 10^5 N_H} = \\ &= \frac{3,3 \cdot 10^{-7} V_0 v^2 \tau}{N_H}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Объем перетекающего воздуха за сутки при непрерывном обдуве кузова ветром со скоростью v получим, полагая в выражении (3.18) $\tau = 86400$ с:

$$V_{cv} = 0,028v^2 V_0 / N_H. \quad (3.19)$$

Из выражений (3.18) и (3.19) следует, что перетекающий объем воздуха пропорционален квадрату скорости ветра и обратно пропорционален постоянной времени натекания кузова N_H .

3.3. УРОВЕНЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ КУЗОВОВ И ДРУГИХ АППАРАТОВ

Основными негерметичными местами в кузовах являются зазоры и щели в разъемных и неразъемных соединениях: контуры дверей, люков, окон, проходные отверстия для крепежа и кабелей, щели в полу и стенах в местах стыка конструктивных элементов. Определить на реальных образцах геометрическую форму и размеры этих щелей не представляется возможным.

Однако для практических целей обеспечения герметичности и для решения вопроса о характере течения воздуха через эти щели необходимо знать, хотя бы приблизительно, их геометрические форму и размеры.

Степень герметичности кузовов оценивается значением установившегося перепада давления (наддува) Δp_q между средой внутри кузова и атмосферой, образующегося при непрерывной подаче в кузов воздуха с расходом q .

Рассмотрим соответствующие параметры герметичности и оценим размеры щелей; для конкретности изложения используем примерные численные значения по одному из типов кузовов.

Кузов должен иметь герметичность такую, чтобы при непрерывной подаче в него воздуха с расходом $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ на каждый кубометр объема установившийся перепад давления был не менее 196 Па ; объем кузова $V_0 = 20 \text{ м}^3$.

Расход $q = 5 \cdot 20 = 100 \text{ м}^3/\text{ч} = 27,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$;

перепад давления $\Delta p_q = 196 \text{ Па}$.

Эта герметичность проверяется так: воздух с постоянным измеряемым расходом q подается в кузов через люк; создающийся при этом перепад давлений Δp_q измеряется дифференциальным манометром; выходит воздух из кузова через щели.

Поскольку щели в различных местах кузова различны, то далее будем говорить о характеристике некоторой средней щели, эквивалентной по своему действию суммарному действию всех щелей кузова.

Выходящий из кузова через щели воздух также имеет расход q , поскольку процесс установился во времени; перепад давлений Δp_q тратится на преодоление сопротивления движению воздуха по щели $\Delta p_{щ}$ и на кинетическую энергию воздуха $\Delta p_{v_{щ}}$, движущегося по щели со скоростью $v_{щ}$, т. е.

$$\Delta p_q = \Delta p_{щ} + \Delta p_{v_{щ}}. \quad (3.20)$$

Фактическое соотношение между $\Delta p_{щ}$ и $\Delta p_{v_{щ}}$ в (3.20) неизвестно; из опыта известна только их сумма Δp_q .

Если предположить, что вся величина Δp_q переходит в $\Delta p_{v_{щ}}$, то получим оценку верхней границы скорости воздуха в щели $v_{щ.в}$; в соответствии с (3.15)

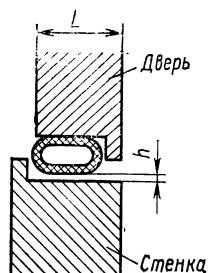
$$\Delta p_q = 9,8 v_{щ.в}^2 / 16; \quad (3.21)$$

$$v_{щ.в} = \sqrt{16 \Delta p_q / 9,8}, \quad (3.22)$$

т. е. для рассматриваемого кузова $v_{щ.в} = \sqrt{16 \cdot 196 / 9,8} \approx 18 \text{ м/с}$.

Таким образом, максимально возможная скорость воздуха в щели определяется по формуле (3.22) и не превышает 18 м/с . Зная эту

Рис. 3.3. Форма уплотнения и эквивалентная щель



скорость, можно оценить минимальную суммарную площадь поперечного сечения щелей S_{\min} . Поскольку q известно, то

$$S_{\min} = q/v_{\text{щ.в.}} \quad (3.23)$$

В рассматриваемом случае получим $S_{\min} = 27,8 \cdot 10^{-3} / 18 = 15,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Фактическая суммарная площадь щелей $S_{\text{ф}}$ больше S_{\min} .

Для оценки фактической площади щелей $S_{\text{ф}}$ и характерных размеров эквивалентной щели (рис. 3.3) — высоты h , длины L и ширины l — используем соотношение для гидравлического сопротивления щели, имея в виду, что по ней происходит течение газа в ламинарном режиме

$$R_{\text{щ}} = 12\mu L / (h^3 l), \quad (3.24)$$

где $\mu = 19,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ — коэффициент вязкости воздуха в нормальных условиях.

Уравнение (3.20) запишем в следующей форме:

$$\Delta p_q = k \Delta p_q + (1-k) \Delta p_q, \quad (3.25)$$

где коэффициентом k обозначим относительную долю общего перепада давлений Δp_q , теряемого на преодоление сопротивления движению воздуха через щели.

Тогда на основании выражений (3.22) — (3.25) получим

$$k \Delta p_q = v S_{\text{щ}} R_{\text{щ}} = v h l \frac{12\mu L}{h^3 l} = \frac{12v\mu L}{h^2}; \quad (3.26)$$

$$v = 1,28 \sqrt{\Delta p_q (1-k)}; \quad (3.27)$$

$$l = q / (v h). \quad (3.28)$$

Система уравнений (3.26) — (3.28) связывает между собой характерные размеры щели h , L и l , параметры Δp_q и q , измеряемые при испытании на герметичность, среднюю скорость перетекания воздуха по щели v и относительную долю k общего перепада давлений, теряемую на преодоление сопротивления движению воздуха по щели.

Поскольку уравнений три, а неизвестных пять (h , L , l , v , k), для

решения этой системы уравнений необходимы еще два дополнительных условия. Длина щели L регламентируется конструкцией: если это щель в разъемных уплотнениях (стыки дверей, люков), то длина щели будет около 10 мм; если это щель в месте стыка панелей между собой, то длина щели будет около 50 мм.

Принимая величину L заданной, из уравнений (3.26) и (3.27), исключив v , получим

$$h^2 = \frac{15,4\mu L \sqrt{(1-k)}}{k \sqrt{\Delta p_q}} \quad (3.29)$$

Таким образом, уравнения (3.27) — (3.29) дают зависимость $h(k)$, $v(k)$, $l(k)$ при известных Δp_q , q и L .

В табл. 3.1 приведены значения v , $S_{щ}$, h , l в зависимости от коэффициента k ; эти значения вычислены по формулам (3.27), (3.23), (3.29), (3.28) при $\Delta p_q = 196$ Па, $q = 27,8 \cdot 10^{-3}$ м³/с и L , равном 10 и 50 мм.

Табл. 3.1 дает возможность оценить характерные размеры щелей. Так, суммарная площадь щелей, вычисленная по (3.23), находится в диапазоне $(1,55 \dots 15) 10^3$ мм²; полученная оценка площади щелей является достоверной, поскольку она вычислена для всех практически возможных значений k .

Таблица 3.1

Оценка размеров щелей

k	v, м/с	S _щ , 10 ³ мм ²	h, мм, при		l, м, при L = 10 мм	Re при L = 10 мм
			L = 10 мм	L = 50 мм		
0,99	1,8	15	0,15	0,33	100	15
0,95	4,0	7	0,23	0,50	30	51
0,9	5,7	4,9	0,27	0,61	18	96
0,7	9,9	2,8	0,42	0,92	6,7	230
0,5	12,7	2,2	0,56	1,24	3,9	425
0,3	15,0	1,85	0,78	1,72	2,4	650
0,1	17,1	1,6	1,4	3,16	1,1	1330
0,05	17,6	1,58	2,0	4,52	0,79	1960
0,01	17,9	1,55	4,7	10,30	0,33	4700

Здесь следует отметить одно важное обстоятельство: по мере уменьшения высоты щелей h суммарная площадь щелей $S_{щ}$ увели-

чивается; это вызвано тем, что при известных q и Δp_q фактически известным оказывается и значение гидравлического сопротивления $R_{щ}$, вычисляемое по формуле (3.3). Поэтому при известном постоянном $R_{щ}$ уменьшение высоты щелей h должно вызывать увеличение суммарной ширины щелей l в соответствии с (3.24), что и ведет к увеличению площади $S_{щ}$.

Поскольку при изготовлении и эксплуатации кузовов маловероятно наличие щелей высотой более 1 мм (более крупные щели легко обнаружить и заделать), то это означает, что, по крайней мере в новых кузовах, высота щелей не превышает 1 мм. При этом в соответствии с табл. 3.1 коэффициент k имеет значение не менее 0,7, т. е. из общего перепада давлений Δp_q (при испытании кузовов на герметичность) не менее $0,7\Delta p_q$ теряется на преодоление сопротивления движению воздуха по щелям, т. е. на преодоление $R_{щ}$.

В щелях движение воздуха и при «дыхании» кузова, и при его испытаниях на герметичность имеет ламинарный характер, так как числа Рейнольдса Re , вычисленные для режима испытаний и указанные в табл. 3.1, при $k > 0,7$ имеют значения гораздо меньше 2320. Эти числа Re определены по следующей формуле

$$Re = vd/\nu,$$

где ν — кинематическая вязкость, равная $0,18 \cdot 10^{-4}$ м²/с для воздуха в нормальных условиях; при «дыхании» кузова числа Re имеют значения меньшие, чем указаны в табл. 3.1, так как в этом случае скорость перетекания воздуха меньше.

Таким образом, рассматривая геометрию щелей и режим перетекания воздуха по ним, видим, что практически весь перепад давлений расходуется на преодоление сопротивления движению воздуха по щелям; при этом скорости перетекания воздуха и размеры щелей таковы, что течение в них имеет ламинарный характер.

Испытание герметичности. Уровень герметичности квазигерметичных приборов и аппаратов однозначно характеризуется значением гидравлического сопротивления щелей $R_{щ}$ или связанным с ним значением постоянной времени натекания N_n . Однако эти величины непосредственно не измеряются, поэтому уровень герметичности (качество герметизации) в технической документации задается через величины, которые могут быть непосредственно измерены при испытании на герметичность. В технике обычно используют два следующих способа.

Для сравнительно герметичных приборов используют способ измерения времени спада избыточного давления от некоторого начального уровня наддува до другого, наперед установленного уровня. Если к начальному моменту времени создать в приборе наддув Δp_0 и при $t = 0$ наддув прекратить, то давление в приборе начнет падать за

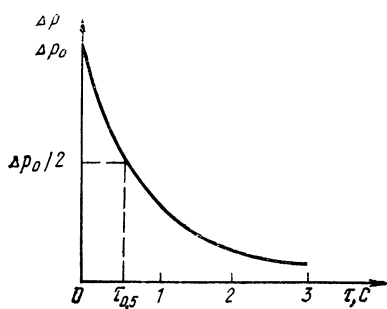


Рис. 3.4. Спад давления при прекращении наддува

счет вытекания воздуха через щели. Это понижение перепада давлений в приборе описывается уравнением

$$\Delta p = \Delta p_0 e^{-\tau/N_n} \quad (3.30)$$

Измеряя непрерывно перепад давлений $\Delta p(\tau)$, фиксируют момент τ_n , при котором давление Δp спадет до некоторого, наперед заданного значения Δp_n , а затем из уравнения (3.30) вычисляют N_n .

Обычно значение Δp_n принимают равным $0,5 \Delta p_0$ и фиксируют при этом время $\tau_{0,5}$ (рис. 3.4); для данного случая получим

$$0,5 \Delta p_0 = \Delta p_0 e^{-\tau_{0,5}/N_n}, \quad N_n = 1,45 \tau_{0,5} \quad (3.31)$$

Рассмотренный способ прост в реализации, однако может применяться только для тех приборов, у которых $N_n > 10$ с; для случая, когда $N_n < 10$ с (для кузовов, крупных шкафов и т. п.) этот способ не пригоден, так как время половинного спада $\tau_{0,5}$ получается малым (единицы или доли секунды) и его измерение связано с большими погрешностями, что приводит к погрешностям в измерении N_n .

Для менее герметичных приборов используют способ непрерывного наддува прибора и измерения постоянного расхода q вдуваемого воздуха и получаемого при этом установившегося перепада давлений Δp_q ; вдуваемый воздух подается в прибор через входное отверстие, а выходит через щели в оболочке. По измеренным значениям q и Δp_q вычисляют значения $R_{щ}$ и N_n по уравнениям (3.3) и (3.6):

$$R_{щ} = \Delta p_q / q; \quad N_n = V_0 \Delta p_q / (p_0 q).$$

Уровень герметичности приборов и аппаратов. В табл. 3.2 приведены оценки параметров герметичности характерных приборов и аппаратов.

3.4. ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОЗДУХООБМЕНА МЕЖДУ ПРИБОРОМ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Интенсивность воздухообмена между прибором (аппаратом) и окружающей средой зависит как от характера внешних воздействий (суточные ходы температуры и атмосферного давления, обдув ветром), так и от уровня герметичности самого прибора (аппарата).

Таблица 3.2

Параметры герметичности характерных приборов и аппаратов

Тип аппаратуры	Постоянная времени натекания N_n , с	Гидравлическое сопротивление щелей $R_{щ}$, кг/(м ⁴ ·с)	Ожидаемая высота щелей h , мм
Приборы и аппараты объемом около 1 м ³	10 ... 100	$10^6 \dots 10^7$	0,04 ... 0,02
Аппараты, в том числе кузова, объемом до 30 м ³	0,1 ... 1	$10^3 \dots 10^4$	0,4 ... 0,2
Тара — плотные деревянные ящики объемом около 1 м ³	0,001 ... 0,01	$10^2 \dots 10^3$	2 ... 1

Выше рассмотрено перетекание воздуха через щели прибора при раздельном воздействии на прибор указанных факторов окружающей среды; количественно эти процессы перетекания воздуха через щели описываются соотношениями (3.11) — (3.14) и (3.19).

Так как суточные ходы температуры и атмосферного давления между собой взаимосвязаны, то их воздействие следует рассматривать как одновременное совместное. Поскольку перетекание воздуха по щелям происходит в ламинарном режиме, то при совместном появлении различных воздействий на основании принципа суперпозиции

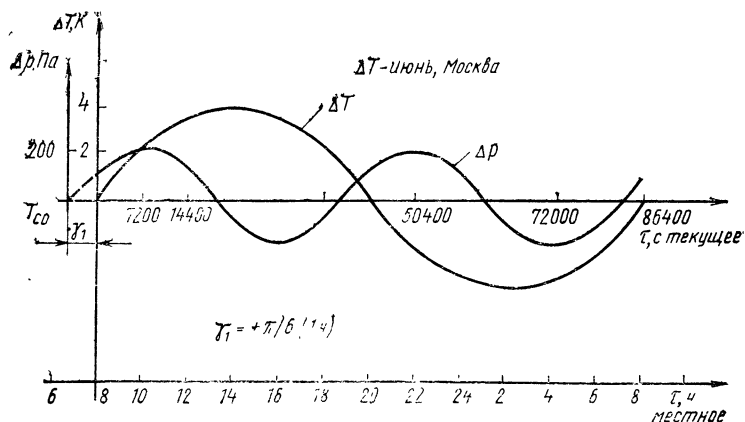


Рис. 3.5. Суточные ходы температуры и атмосферного давления

можно суммировать результаты этих воздействий; при этом суммировании следует учитывать следующие особенности.

Суточный ход температуры имеет синусоидальный характер с периодом в одни сутки ($\omega = 7,27 \cdot 10^{-5}$ рад/с), суточный ход атмосферного давления имеет синусоидальный характер с периодом в половину суток ($\omega_1 = 14,54 \cdot 10^{-5}$ рад/с); причем синусоида давления сдвинута по фазе на угол γ_1 относительно синусоиды температуры.

На совмещенном графике суточных ходов температуры и атмосферного давления за ноль отсчета времени t принято 8 ч местного времени, так как в это время фактическая температура воздуха окружающей среды равна средней суточной температуре воздуха (для лета); угол γ_1 сдвига фаз синусоид составляет $\pi/6$, так как в 7 ч местного времени атмосферное давление равно среднему суточному давлению.

Анализ зависимостей (3.11) — (3.19) показывает, что интенсивность воздухообмена прибора при изменениях температуры и атмосферного давления определяется значением коэффициентов $1/\sqrt{1+N_H^2\omega^2}$ и $1/\sqrt{1+N_H^2\omega_1^2}$, характеризующих ослабляющее действие щелей оболочки на интенсивность воздухообмена; интенсивность воздухообмена при действии ветра определяется значением постоянной времени натекания N_H , т. е. также действием щелей оболочки (рис. 3.6, 3.7).

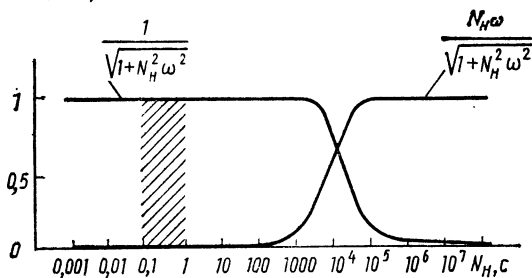


Рис. 3.6. Графики коэффициентов $1/\sqrt{1+N_H^2\omega^2}$ и $N_H\omega/\sqrt{1+N_H^2\omega^2}$

Изменения перетекающего объема воздуха ΔV_T вследствие суточного хода температуры и перетекающего объема воздуха ΔV_P вследствие суточного хода атмосферного давления, а также изменение их алгебраической суммы в течение суток показаны на рис. 3.8; эти графики построены по зависимостям (3.12) и (3.14) при постоянной времени натекания, равной 1 с.

Изменение относительного перетекающего объема воздуха $V_{св}/V_0$ в зависимости от уровня герметичности прибора при обдуве его ветром со скоростью, равной 2,7 м/с, показано на рис. 3.9.

При конструировании каждого конкретного прибора, задаваясь определенным значением N_H его оболочки и обеспечивая это значение N_H соответствующими конструктивными мерами, можно по соотношениям (3.11) — (3.19) и известным условиям эксплуатации рассчитать ожидаемые суточные объемы воздухообмена прибора.

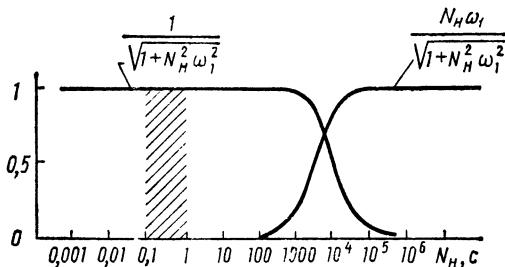


Рис. 3.7. Графики коэффициентов $1/\sqrt{1+N_H^2\omega_1^2}$ и $N_H\omega_1/\sqrt{1+N_H^2\omega_1^2}$

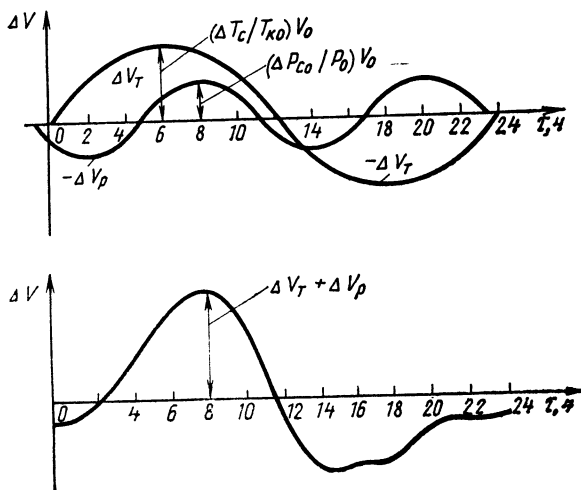


Рис. 3.8. Изменение перетекающего объема воздуха при совместном действии ΔT и Δp

Предварительный выбор необходимого уровня герметичности прибора, т. е. предварительный выбор постоянной времени натекания прибора N_H , можно проводить с помощью табл. 3.3, в которой пока-

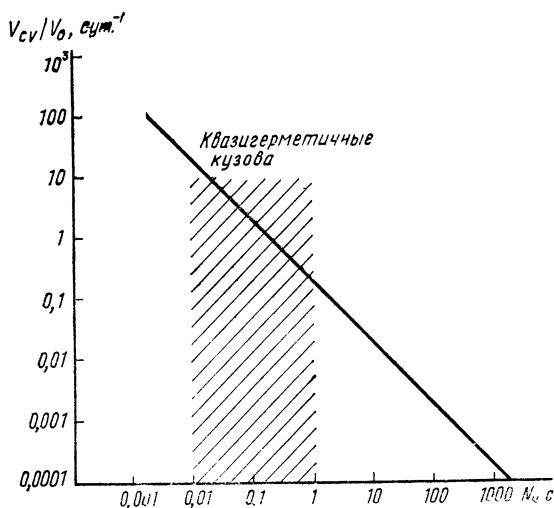


Рис. 3.9. Изменение перетекания воздуха при обдуве прибора ветром за степень ослабления воздействия окружающей среды на герметичные и квазигерметичные приборы.

Таблица 3.3

Степень ослабления воздействия окружающей среды на приборы

Воздействие окружающей среды	Герметичные приборы $N_n \geq 10^6$ с	Квазигерметичные приборы		
		$N_n = 10^2 \dots 10^6$ с	$N_n = 1 \dots 10^2$ с	$N_n < 1$ с
Суточный ход температуры	Воздействие полностью ослаблено	Воздействие ослаблено	Воздействие не ослаблено	
Суточный ход атмосферного давления	То же	То же	То же	
Обдув ветром	»	Воздействие ослаблено достаточно		Воздействие ослаблено мало

3.5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УРОВНЯМ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПРИБОРОВ

Анализ соотношений (3.11) — (3.19) позволяет сделать ряд рекомендаций, изложенных ниже.

1. Большинство приборов, в которых в процессе конструирования и изготовления принимаются обычные меры по их герметизации, выполняются квазигерметичными с постоянной времени натекания $N_n \leq 100$ с.

В таких приборах перетекание воздуха через щели под действием суточных ходов температуры и атмосферного давления практически не ослабляется этими щелями, так как коэффициенты

$$1/\sqrt{1+N_n^2\omega^2}$$

и $1/\sqrt{1+N_n^2\omega_1^2}$ приближенно равны единице, а коэффициенты

$N_n\omega/\sqrt{1+N_n^2\omega^2}$ и $N_n\omega_1/\sqrt{1+N_n^2\omega_1^2}$ приближенно равны нулю.

Для этих приборов зависимости (3.11)—(3.14) упрощаются и принимают вид:

$$\Delta p_T \approx 0; \quad (3.32)$$

$$\frac{\Delta V_T}{V_0} = \frac{\Delta T_c}{T_{к0}} \sin \omega \tau; \quad (3.33)$$

$$\Delta p_p \approx 0; \quad (3.34)$$

$$\frac{\Delta V_p}{V_0} = - \frac{\Delta p_{c0}}{p_0} \sin(\omega_1 \tau + \gamma_1). \quad (3.35)$$

Физически эти зависимости означают, что ΔT и Δp вызывают небольшие перепады давлений, которые непрерывно выравниваются за счет перетекания воздуха; на рис. 3.8 изображен график перетекающего объема воздуха при совместном действии ΔT и Δp .

Максимальные суточные перетекающие объемы определим из выражений (3.33) и (3.35), имея в виду, что $\sin \omega \tau$ и $\sin(\omega_1 \tau + \gamma_1)$ изменяются в интервале $+1 \dots -1$:

$$\Delta V_{Tc}/V_0 = 2\Delta T_c/T_{к0}; \quad (3.36)$$

$$\Delta V_{pc}/V_0 = 4\Delta p_{c0}/p_0, \quad (3.37)$$

где ΔV_{Tc} , ΔV_{pc} — перетекающий за сутки через прибор объем воздуха под действием соответственно суточного изменения температуры прибора и изменения атмосферного давления, м³; эти объемы воздуха входят («вдох») и выходят («выдох») из прибора.

Таким образом, изменения температуры и атмосферного давления приводят к «дыханию» всех квазигерметичных приборов ($N_n \leq 100$ с) по зависимостям (3.33) и (3.35).

2. Действие постоянной скорости ветра v , как это следует из выражения (3.19) и рис. 3.9, таково, что суточный объем перетекающего воздуха V_{cv} обратно пропорционален N_n для всех типов квазигерметичных приборов. Повышение уровня герметичности (увеличение N_n) или его понижение (уменьшение N_n) существенно влияют на объем перетекающего воздуха. Поэтому для кузовов и других приборов, подвергающихся непосредственному обдуву ветром, уровень герметичности должен выбираться и обеспечиваться соответствующей конструкцией и качеством изготовления таким, чтобы значение V_{cv} было менее допустимого.

3. Переход от квазигерметичных приборов к приборам герметичным требует создания такого уровня герметичности прибора, при котором $N_n \geq 10^6$ с.

Однако создание такого уровня герметичности у прибора требует решения двух серьезных конструктивно-технологических задач:

большие значения N_n ($N_n > 10^6$ с) означают очень малые размеры щелей (например, при $V_0 = 1$ м³, $N_n = 10^6$ с $R_{щ} = 10^{11}$ кг/(м⁴·с), что соответствует одной круглой щели диаметром 0,08 мм и длиной $L = 5$ мм); обеспечить конструктивно и технологически такие малые размеры щелей в процессе производства и эксплуатации прибора очень сложно;

большие значения N_n означают, что создающиеся в процессе эксплуатации перепады давлений не выравниваются вследствие отсутствия перетекания воздуха через щели и полностью прикладываются к оболочке прибора; при этом оболочка прибора должна выдерживать этот суммарный перепад давлений, не давать остаточных деформаций, а ее упругие деформации не должны ухудшать степень герметичности оболочки. Обеспечить такую необходимую прочность и жесткость оболочки конструктивно очень сложно, в особенности для приборов (кузовов) большого размера (емкостью $V_0 > 1$ м³).

Таким образом, оболочка полностью герметичного прибора ($N_n > 10^6$ с) должна удовлетворять двум требованиям:

щель в такой оболочке должна иметь суммарную площадь менее 0,01 мм²;

оболочка должна выдерживать без остаточных деформаций и ухудшения степени герметичности весь образующийся перепад давлений, в том числе и перепад давлений при авиаперевозках.

Выполнение этих требований связано с целым рядом конструктивных и технологических трудностей, в особенности для крупных приборов объемом $V_0 > 1$ м³; именно поэтому среди приборов и кузовов объемом свыше 1 м³ практически нет полностью герметичных;

и только для небольших приборов (объемом менее $0,1 \text{ м}^3$) удастся преодолеть эти трудности и создать герметичные оболочки.

4. Часто в процессе эксплуатации и хранения кузовов (приборов) для повышения их уровня герметичности применяют различные способы уплотнения герметизирующей оболочки в местах нарушения герметичности и в «подозрительных» местах (замазка щелей и швов мастикой, обклеивание липкой лентой, многослойное покрытие швов, щелей, всей оболочки лаками и красками и т. п.).

Такие способы применяют как с целью повышения уровня герметичности изделий, бывших в эксплуатации, так и с целью создания дополнительной герметизации новых изделий, помещенных на консервацию и хранение.

Такая дополнительная герметизация увеличивает постоянную времени натекания N_n и, следовательно, уменьшает объем воздуха, перетекающего через щели. Однако это справедливо только для случая действия ветра. Что же касается объемов перетекания воздуха через щели под действием изменений температуры и атмосферного давления, то такая дополнительная герметизация не может уменьшить эти объемы по двум обстоятельствам:

дополнительная герметизация не может быть выполнена настолько тщательно, чтобы обеспечить $N_n > 10^4 \dots 10^6 \text{ с}$; для получения такой N_n необходима суммарная площадь щелей, равная не более единице квадратных миллиметров, что трудно выполнимо;

даже если и удастся обеспечить в данный момент $N_n > 10^4 \dots 10^6 \text{ с}$, замазав практически все щели, то в первые же сутки за счет суточных ходов температуры и атмосферного давления будут созданы такие перепады давлений, которые либо разрушат эти дополнительно уплотненные места, либо будут деформировать другие элементы оболочки до тех пор, пока не ухудшится герметичность и за счет этого не уравнивается давление.

Таким образом, даже самая тщательная дополнительная герметизация может повысить N_n только до 1000 с (при больших N_n создается перепад давлений, который эту герметизацию разрушает и снижает N_n до уровня 1000 с); при этом снижается объем воздуха, перетекающего через щели под действием ветра, а объем воздуха, перетекающего через щели вследствие изменения температуры и атмосферного давления, не уменьшается.

3.6. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОБЪЕМА ВОЗДУХА, ПЕРЕТЕКАЮЩЕГО ЧЕРЕЗ ЩЕЛИ В КУЗОВЕ

Для количественной оценки объемов перетекающего воздуха проведем расчет для кузова, находящегося на открытом воздухе; аппаратура внутри кузова находится в выключенном состоянии, т. е. не выделяет теплоту.

Исходные данные: кузов объемом $V_0 = 20 \text{ м}^3$ (объем воздушного пространства внутри кузова 20 м^3), постоянная времени натекания кузова $N_n = 0,06 \dots 20 \text{ с}$, географические пункты — города Москва, Таллинн, месяц года — июнь.

Результаты расчета суточных объемов перетекающего воздуха сведены в табл. 3.4; эти расчеты выполнены так.

1. ΔV_{Tc} вычислено по соотношению (3.36); при этом для Москвы $T_{k0} = 288,8 \text{ К}$, для Таллинна $T_{k0} = 286,2 \text{ К}$; значения $\Delta T_c = \Delta t_c$ взяты из табл. 1.2, при этом добавлено по 2 К перепада температуры, образующегося вследствие непосредственного воздействия солнечной радиации на кузов.

2. ΔV_{pc} вычислено по формуле (3.37).

3. V_v вычислен по формуле (3.19).

Расчет показывает следующее.

1. Объемы ΔV_{Tc} и ΔV_{pc} воздуха, перетекающего вследствие изменений температуры и атмосферного давления окружающего воздуха, не зависят от N_n .

2. Объем V_v воздуха, перетекающего вследствие действия ветра, существенно зависит от N_n и скорости ветра v .

3. Если кузов в процессе хранения непосредственно обдувается ветром, то степень его герметичности должна быть такой, чтобы $N_n \geq 2 \text{ с}$; при этом суточный объем перетекающего воздуха даже для тяжелых условий г. Таллинна (средняя скорость ветра 5 м/с) составит около $0,4 V_0$, что вполне приемлемо.

Таблица 3.4

Таблица к примеру расчета

Географический пункт	Постоянная натекания кузова $N_n, \text{ с}$	Скорость ветра $v, \text{ м/с}$	$\Delta T_c, \text{ К}$	$P_{c0}, \text{ Н/м}^2$	Перетекающий суточный объем			
					$\Delta V_{Tc}/V_0$	$\Delta V_{pc}/V_0$	V_v/V_0	$\Sigma \Delta V/V_0$
Москва	20						0,0082	0,0537
	2						0,082	0,128
	0,4	2,4	6	200	0,0415	0,004	0,41	0,456
	0,06						2,74	2,79
Таллинн	20						0,0356	0,0710
	2						0,356	0,391
	0,4	5,0	4,5	200	0,0314	0,004	1,78	1,82
	0,06						11,9	11,9

ВЛАГООБМЕН ЭЛЕМЕНТОВ АППАРАТУРЫ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

4.1. ЗАМЕЧАНИЯ О ВЛАГООБМЕНЕ ЭЛЕМЕНТОВ АППАРАТУРЫ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Влагообмен элементов аппаратуры с окружающей средой представляет собой сложный процесс, зависящий от процессов, протекающих как на границе элемента с окружающей средой, так и внутри элемента.

Рассмотрим особенности влагообмена элементов с воздухом, окружающим их (рис. 4.1). Будем считать, что этот влагообмен происходит при нормальных температуре $+20^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении, т. е. влагообмен изотермический и движущей силой этого влагообмена является разность $(p_v - p_n)$ парциальных давлений водяного пара в воздухе и на поверхностном слое элемента, контактирующем с воздухом.

Все элементы аппаратуры в зависимости от свойств поверхностного слоя можно разделить на две большие группы: поглощающие влагу и не поглощающие влагу.

Поглощают влагу те поверхностные слои, материал которых имеет поры, а поперечный размер превышает размер молекул воды, равный приблизительно $0,32\text{ нм}$ [14]. Поэтому не поглощают влагу металлы, а также стекло и некоторые виды керамики, имеющие мелкие поры; все же органические материалы, как натуральные (шелк, хлопок, бумага, дерево, кожа и др.), так и искусственные (пластмассы, лаки, краски), поглощают влагу.

Приведем поперечные размеры пор в различных материалах [4], нм:

Расстояние между атомами в кристаллах металлов	0,2...0,4
Внутримолекулярная пористость органических материалов	До 1
Межмолекулярная пористость органических материалов	1...5
Поры в стенках волокна	1...10
Капилляры в стенках целлюлозы	100
Макропоры в керамике	$10^2 \dots 10^5$

Далее при рассмотрении процессов влагообмена будем применять термины «граничный слой» и «поверхностный слой». Граничным слоем будем называть слой воздуха, в котором происходит не-

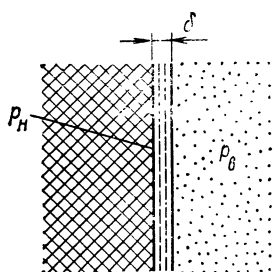


Рис. 4.1. Схема влагообмена элемента аппаратуры с окружающим воздухом (δ — толщина пленки влаги на поверхности)

посредственный контакт воздуха с твердой поверхностью элементов; в этом слое при $\varphi_{\text{в}} > 60\%$ возникает пленка влаги. Поверхностным слоем будем называть слой твердого материала элемента, прилегающий к граничному слою.

Для элементов, поверхностный слой которых не поглощает влагу, процесс влагообмена с окружающей средой представляет собой только процесс сорбции (или десорбции) влаги поверхностью. Кинетика и динамика этого процесса рассмотрены в гл. 2. Из изложенного в гл. 2 следует, что на поверхности любого материала, в том числе и не поглощающего влагу, практически мгновенно (за $10^{-5} \dots 10^{-7}$ с) образуется пленка влаги, находящаяся в динамическом равновесии с водяными парами окружающего воздуха; при этом толщина пленки зависит от относительной влажности $\varphi_{\text{в}}$ окружающего воздуха. Там же показано, что при относительной влажности менее 55% эта пленка влаги имеет толщину менее десятка молекулярных слоев и такая пленка влаги уже теряет физические свойства жидкости и является паром [14].

Для элементов, поверхностный слой которых поглощает влагу, процесс влагообмена с окружающей средой представляет собой взаимодействие процессов сорбции влаги поверхностью и диффузионного проникновения влаги внутрь материала. При этом наличие или отсутствие пленки влаги на поверхности существенно изменяет условия влагообмена: при наличии пленки влаги (т. е. при $\varphi_{\text{в}} > 60\%$) фактически происходят два процесса — образование пленки влаги на поверхности и влагообмен между этой пленкой и толщей материала; при отсутствии пленки влаги (т. е. при $\varphi_{\text{в}} < 50 \dots 60\%$) фактически происходит один процесс — непосредственный обмен водяными парами между окружающим воздухом и толщей материала.

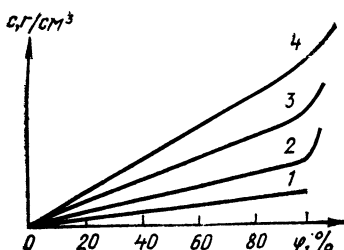
Многочисленные экспериментальные данные показывают [4], что при $\varphi_{\text{в}} < 55 \dots 60\%$ равновесная концентрация влаги $c_{\text{м}}$ в материале пропорциональна парциальному давлению водяных паров $p_{\text{в}}$ в окружающем воздухе, т. е.

$$c_{\text{м}} = h p_{\text{в}}. \quad (4.1)$$

Эта зависимость, известная как закон Генри, справедлива только до $\varphi_{\text{в}} \approx 60\%$, что и показано на рис. 4.2 [4]; при $\varphi_{\text{в}} > 60\%$ связь между концентрацией влаги и парциальным давлением паров становится нелинейной. По мнению автора, эта нелинейность и вызывается именно тем обстоятельством, что в данном случае влагообмен материала

Рис. 4.2. Изотермы сорбции влаги полимерными материалами:

1 — полиэтилен; 2 — текстолит;
3 — бумага; 4 — резина



происходит не с газом, окружающим его, а с образующейся на поверхности пленкой сжиженного газа.

Таким образом, можно считать, что при $\varphi_v < 60\%$ влагообмен между влагопоглощающим материалом и окружающим его воздухом происходит путем перемещения водяных паров без перехода их в жидкую фазу на поверхности; а при $\varphi_v > 60\%$ этот влагообмен происходит через пленку влаги, образующуюся на поверхности.

Как показано в гл. 2, в системах регулирования и поддержания влажности с целью обеспечения повышенной надежности работы аппаратуры необходимо поддерживать относительную влажность воздуха в интервале $30\% \leq \varphi \leq 55\%$. Поэтому в таких системах влагообмен элементов с окружающей средой происходит при $\varphi_v < 55\%$, т. е. при перемещении водяных паров без образования жидкой пленки влаги на поверхности. Учитывая это условие, можно принять для рассматриваемого класса задач следующую физическую модель влагообмена для поглощающих влагу материалов: влага в виде водяных паров за счет либо только диффузии, либо диффузии и конвекции перемещается в воздухе к границе материал — воздух и затем за счет диффузии — внутри материала.

Для решения практических задач необходимо знать количественные характеристики влагообмена, т. е. изменение во времени следующих параметров процесса влагообмена: расхода влаги на границе материал — воздух и в любом сечении на заданной глубине от границы; концентрации влаги в любой заданной точке материала; парциального давления водяных паров в воздухе; суммарного количества влаги, прошедшей через заданное сечение в рассматриваемый промежуток времени. Получить указанные параметры в функции времени можно только при соизмерном рассмотрении внутреннего и внешнего влагообмена, т. е. при рассмотрении количественных характеристик диффузионного перемещения влаги внутри материала и диффузионно-конвективного перемещения влаги на границе материал — воздух. Сравнение между собой значений коэффициентов диффузии влаги в материалах и в воздухе (табл. 4.1) показывает, что коэффициент диффузии влаги в воздухе в 10^5 — 10^8 раз больше, чем в материале; следовательно, выравнивание концентраций влаги в воздухе будет происходить в 10^5 — 10^8 раз быстрее, чем в материале, и поэтому такой

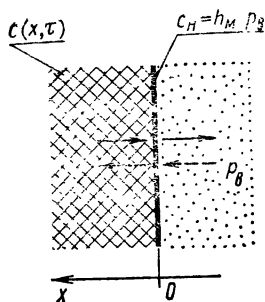


Рис. 4.3. Модель влагообмена

процесс можно считать мгновенным по сравнению с процессом в материале. Это дает основание принять следующую физическую модель влагообмена влагопоглощающего материала с окружающим его влажным воздухом (рис. 4.3).

1. В окружающем воздухе, в том числе и в граничном слое воздуха, парциальное давление водяных паров в любой момент времени τ одинаково во всех сечениях x , т. е.

$$p_v(x, \tau) = p_v(0, \tau) = p_v(\tau).$$

2. Пленка влаги на границе материал — воздух имеет толщину менее десятка молекулярных слоев и, не обладая свойствами жидкости, не препятствует непосредственному контакту водяных паров воздуха с поверхностью материала; на границе не происходит накопления влаги.

3. В поверхностном наружном слое материала мгновенно устанавливается концентрация c_n , равновесная с окружающим воздухом, т. е. в поверхностном наружном слое и окружающем воздухе мгновенно выравниваются парциальные давления водяных паров; при этом по закону Генри

$$p_v = \frac{c_v}{h_v} = \frac{c_n}{h_m}, \quad (4.2)$$

где c_v , c_n — концентрация влаги соответственно в воздухе и наружном слое материала; h_v и h_m — коэффициенты растворимости влаги соответственно в воздухе и материале.

4. Концентрация влаги c во внутренних слоях материала постепенно за счет диффузионного проникновения влаги выравнивается с концентрацией влаги в наружном слое c_n , т. е. $c = c(x, \tau)$; при этом в зависимости от соотношения между значениями начальной концентрации влаги во внутренних слоях $c(x, 0)$ и концентрации влаги в наружном слое c_n будет происходить либо увлажнение материала элемента (при $c < c_n$), либо осушение этого материала (при $c > c_n$).

Принятая модель влагообмена означает, что концентрация влаги в наружном поверхностном слое материала непрерывно находится в равновесии с влажностью окружающего воздуха и при изменении последней мгновенно отслеживает эти изменения. Движущей силой влагообмена является разность концентраций влаги между внутренними и наружными слоями; эта разность концентраций и вызывает

Таблица 4.1

Характеристики влагопоглощения некоторых материалов

Материал	D, м ² /с	P, с	b, с ² /м ²
Полиэтилен высокого давления	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$5,3 \cdot 10^{-16}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
Полистирол	$8,3 \cdot 10^{-11}$	$6,2 \cdot 10^{-15}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$
Полиметилметакрилат	$7,8 \cdot 10^{-12}$	$7,6 \cdot 10^{-15}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$
Полихлорвинил	$2,7 \cdot 10^{-12}$	$2,6 \cdot 10^{-15}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$
Полихлорстирол	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$4,2 \cdot 10^{-15}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
Фторопласт-4	$8,3 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-16}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Триацетатцеллюлоза	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
Эпоксидная смола	$2,3 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-15}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$
Кремнийорганическая резина	$8,4 \cdot 10^{-12}$	$5,0 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$
Пластмасса К-211-34	$2,8 \cdot 10^{-13}$	$5,3 \cdot 10^{-16}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Пластмасса КМК-9	$4,2 \cdot 10^{-12}$	$6,3 \cdot 10^{-14}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Компаунд МГФ-1	$8,3 \cdot 10^{-13}$	$6,2 \cdot 10^{-17}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$
Эмаль КО-936	$3,9 \cdot 10^{-11}$	$2,1 \cdot 10^{-14}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
Дерево (сосна)	$2,0 \cdot 10^{-10}$	$8,4 \cdot 10^{-12}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$
Силикагель КСК	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
Пары воды в воздухе	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$

диффузионный перенос влаги внутри материала. Такая модель означает, что из трех слагаемых влажностного сопротивления (см. 4.7) — сопротивлений материала, границы материал — воздух, воздуха — сопротивление материала является основным (оно в 10^5 — 10^8 раз больше двух других) и именно оно определяет интенсивность и динамику процесса влагообмена.

4.2. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЛАГОПОГЛОЩЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Процессы диффузионного перемещения и накопления влаги в материалах количественно описываются коэффициентами влагопроницаемости (проницаемости), растворимости и диффузии [17].

Коэффициент проницаемости P , с, характеризует процесс прохождения паров воды сквозь материал в установившемся состоянии.

Суммарное количество влаги G_n , кг, проходящей в установившемся состоянии через стенку толщиной b и площадью F за время τ при перепаде давлений Δp на стенке составит:

$$G_n = PF \frac{\Delta p}{b} \tau. \quad (4.3)$$

Коэффициент влагорастворимости (растворимости) h , с²/м², характеризует количество накопленной влаги материалом в установившемся (равновесном) состоянии, т. е. количество растворенной в материале влаги.

Суммарное количество влаги, ΔG_n , кг, накопленное материалом в установившемся (равновесном) состоянии при изменении давления вокруг материала на Δp , составит:

$$\Delta G_n = hV\Delta p. \quad (4.4)$$

Коэффициент диффузии D , м²/с, определяет скорость процесса проникновения влаги в материал:

$$D = P/h.$$

4.3. АНАЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В рамках линейной теории процессы переноса влаги аналогичны процессам переноса электричества.

Поскольку процессы переноса электричества изучены гораздо глубже, чем процессы переноса влаги, и многие виды процессов, в том числе и нестационарные, описаны аналитически, можно, используя метод аналогии, применить к процессам переноса влаги аналитические описания аналогичных электрических процессов; в табл. 4.2 приведены эти аналогии [13].

Далее наряду с термином перенос (влаги, электричества) будем использовать эквивалентный ему по смыслу термин передача (влаги, электричества).

Стационарный процесс передачи через плоскую параллельную стенку. При стационарном (установившемся) процессе передачи в стенке не происходит накопления передаваемой влаги, электричества; на границах стенки заданы значения s , U (рис. 4.4).

При передаче электричества по закону Ома

$$I = \frac{\partial U}{\partial R} = \frac{U_1 - U_2}{R} = \frac{\Delta U}{R},$$

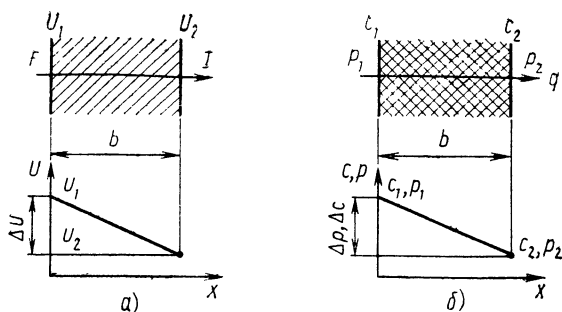


Рис. 4.4. Распределение напряжения (а) и концентрации влаги (б) при стационарном процессе

Т а б л и ц а 4.2

Аналогия параметров переноса влаги и электричества

Влага	Электричество
Время τ , с	Время τ , с
Переносимая масса влаги M , кг	Переносимый заряд Q , А·с
Массовый расход влаги q , кг/с: $q = dM/d\tau$	Сила тока I , А: $I = dQ/d\tau$
Перепад давления водяных паров Δp , Па	Перепад напряжения ΔU , В
Перепад концентрации влаги Δc , кг/м ³ $\Delta c = h\Delta p$	ΔU , В
Коэффициент влагопроницаемости P , с	Удельная проводимость σ , Ом ⁻¹ ·м ⁻¹
Коэффициент влагорастворимости h , с ² /м ²	Удельная объемная емкость C , Ф/м ³ , или удельная поверхностная емкость, так как заряды из объема накапливаются на поверхности
Коэффициент диффузии D , м ² /с: $D = P/h$	Величина, обратная распределенной по площади постоянной времени, σ/C , м ² /с
Влажностное сопротивление плоской стенки R_B , м ⁻¹ ·с ⁻¹ : $R_B = \frac{b}{PF} = \frac{b}{hDF}$	Электрическое сопротивление плоской стенки, $R = b/(\sigma F)$, Ом

где $R=b/(\sigma F)$ — электрическое сопротивление плоской стенки; Ом; b — толщина стенки, м; σ — коэффициент проводимости материала стенки, Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$; F — площадь стенки, м 2 .

При передаче влаги и задании около границ стенки давления водяных паров p_1 и p_2 получим первый закон Фика в следующем виде:

$$\begin{aligned} q &= -PF \frac{\partial p}{\partial b} = -PF \frac{p_2 - p_1}{b} = \\ &= PF \frac{p_1 - p_2}{b} = PF \frac{\Delta p}{b}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где q — массовый расход влаги, кг/с; P — коэффициент влагопроницаемости, с; b — толщина стенки, м; F — площадь стенки, м 2 ; p — давление водяных паров, Па.

При задании концентрации влаги c в поверхностных слоях, учитывая, что $c=hp$, получим первый закон Фика в таком виде:

$$\begin{aligned} q &= - \frac{PF}{h} \frac{\partial c}{\partial b} = -DF \frac{\partial c}{\partial b} = \\ &= DF \frac{c_1 - c_2}{b} = DF \frac{\Delta c}{b}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Введем величину R_b , которую по аналогии назовем влажностным сопротивлением:

$$R_b = \frac{b}{PF} = \frac{b}{hDF}, \quad (4.7)$$

где R_b — влажностное сопротивление плоской стенки, м $^{-1}$ ·с $^{-1}$.

Из выражений (4.5) — (4.7) получим

$$\Delta p = q R_b; \quad (4.8)$$

$$\Delta c = q R_b h. \quad (4.9)$$

Следует отметить, что измерительными приборами непосредственно измерить концентрацию влаги c в поверхностном слое очень трудно, так как она по толщине распределена неравномерно. Значение c удастся измерить косвенными методами только для материала, находящегося в равновесном состоянии с окружающим воздухом, имеющим известное значение давления водяных паров p , для равновесных состояний концентрации влаги $c=hp$.

Стационарный процесс передачи через составную параллельную стенку. В этом случае в процессе передачи в стенке также не происходит накопления влаги (электричества), но поток влаги (электричества) последовательно преодолевает несколько влажностных (электрических) сопротивлений.

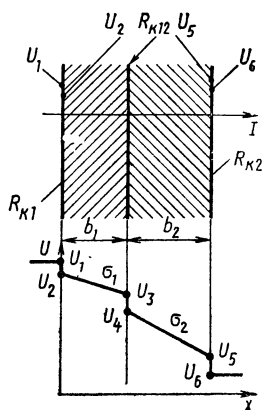


Рис. 4.5. Распределение напряжений при стационарном процессе передачи электричества через составную плоскую стенку

При передаче электричества (рис. 4.5)

$$\Delta U = U_1 - U_6 = I \sum_{i=1}^n R_i = I (R_{K1} + R_I + R_{K12} + R_{II} + R_{K2} + R_{III} + R_{IV} + R_{K3}),$$

где R_{K1} , R_{K2} , R_{K12} — контактные сопротивления соответственно на границах и между слоями стенки, Ом;

$$R_I = \frac{b_1}{\sigma_1 F}; \quad R_{II} = \frac{b_2}{\sigma_2 F}.$$

При передаче влаги через составную стенку, на границах которой заданы значения давления водяных паров p (рис. 4.6), получим по аналогии:

$$\Delta p = p_1 - p_3 = q \sum_{i=1}^n R_{B_i} = q (R_{BK I} + R_{B I II} + R_{B II III} + R_{B III IV} + R_{BK IV}), \quad (4.10)$$

где $R_{BK I}$, $R_{BK IV}$ — влажностные сопротивления на границах I, IV, $m^{-1} \cdot c^{-1}$; $R_{B I II}$ — влажностное сопротивление на стыке; $R_{B I II} =$

$$= \frac{b_1}{P_1 F}, \quad R_{B III IV} = \frac{b_2}{P_2 F} \text{ — влажностные сопротивления слоев}$$

стенки, $m^{-1} \cdot c^{-1}$.

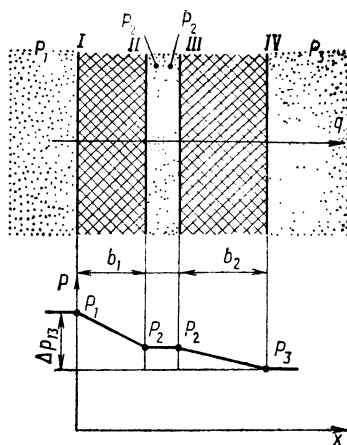


Рис. 4.6. Распределение давлений водяных паров при стационарном процессе передачи влаги через составную плоскую стенку

На рис. 4.6 стык между слоями условно изображен увеличенным; в реальных конструкциях зазор в стыке зависит от многих факторов, в том числе и от микрогеометрии граничных поверхностей II и III. В любом случае при отсутствии в зазоре клея или другой твердой связки между поверхностями II и III будет находиться некоторое количество воздуха с давлением водяных паров p_2 . В связи с тем что диффузия в газе, в том числе и в воздухе, происходит в 10^5 — 10^8 раз быстрее, чем в твердом теле, давление водяных паров у поверхностей II и III будет практически одинаковым, что и изображено на графике рис. 4.6 горизонтальным участком p_2 — p_2 .

Это означает, что в стыке между слоями, при наличии в нем воздуха, нет перепада давления водяных паров при передаче через стенку массового расхода влаги q , т. е. в таком стыке влажностное сопротивление практически равно нулю (по сравнению с влажностным сопротивлением твердых слоев стенки), поэтому

$$R_{в II III} = 0. \quad (4.11)$$

По этим же причинам влажностные сопротивления $R_{вк I}$ и $R_{вк IV}$ на границах I и IV также малы по сравнению с влажностными сопротивлениями $R_{в I II}$ и $R_{в III IV}$, т. е.

$$R_{вк I} = R_{вк IV} = 0. \quad (4.12)$$

С учетом изложенного из выражения (4.10) получим

$$\Delta p = p_1 - p_2 = q \sum_{i=1}^n R_{вi} = q \left(\frac{b_1}{P_1 F} + \frac{b_2}{P_2 F} \right). \quad (4.13)$$

В соответствии с (4.13) на рис. 4.6 изображен график распределения давления водяных паров в составной плоской стенке.

Для перепада давлений в любом слое стенки на основе выражения (4.13) получим

$$\Delta p_i = q R_{вi} = \Delta p R_{вi} / \sum_{i=1}^n R_{вi}. \quad (4.14)$$

При решении задачи передачи влаги через составную стенку, на границах I и IV которой заданы не значения давления водяных паров p_1 и p_3 , а значения концентрации влаги c_1 в поверхностном слое I и c_{IV} в поверхностном слое IV, для составных стенок, состоящих из разнородных материалов, нельзя сразу получить распределение концентрации по толщине, так как коэффициенты растворимости влаги h_1 и h_2 в этом случае различны. Для решения такой задачи надо от концентрации c на границах перейти к давлению водяных паров p по соотношению (4.2), и уже затем, используя выражения (4.2), (4.13) и (4.14), найти распределение давления и концентрации. При этом в

Рис. 4.7. Распределение концентрации при стационарном процессе передачи влаги через составную плоскую стенку

стенках, состоящих из различных материалов, в зоне стыка происходит резкое изменение концентрации; это обстоятельство и отображено на рис. 4.7.

Нестационарный влагообмен плоской стенки и методика решения его задач. Указанные в табл. 4.2 аналогии параметров передачи влаги и электричества используем далее и для описания нестационарных процессов влагообмена.

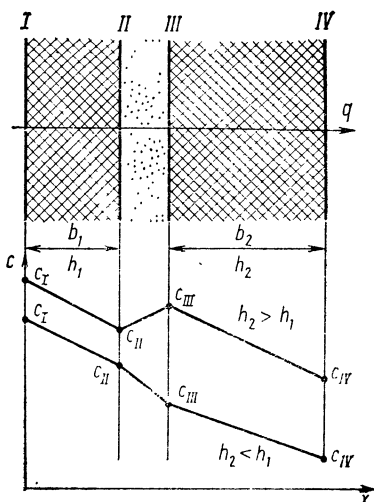
Нестационарный влагообмен многих элементов аппаратуры можно рассматривать в первом приближении как нестационарный влагообмен плоской влагопоглощающей стенки с окружающей средой. Именно поэтому и изложено решение данной задачи в следующей последовательности.

1. Рассмотрена диффузия влаги в плоской стенке на основе классической теории [2]; полученные при этом для каждой зоны стенки аналитические зависимости концентрации, массового расхода, переносимой массы влаги от времени позволяют вычислить любой из этих параметров. Однако эти аналитические, так называемые точные зависимости неудобны как для инженерных расчетов, так и для построения теории систем регулирования влажности.

2. Проведено приближение точных зависимостей с целью получения их в форме моделей, пригодных для использования в теории систем автоматического регулирования. Дан анализ соответствия точных зависимостей и приближенных моделей.

3. Показан переход от задачи влагообмена с распределенными параметрами к задаче влагообмена с сосредоточенными параметрами и на этой основе дано аналитическое описание нестационарных процессов влагообмена в плоской стенке. С использованием преобразования Лапласа получены передаточные функции, определяющие основные динамические характеристики плоской стенки.

4. Полученные таким образом передаточные функции процесса влагообмена дают возможность проводить анализ и синтез систем автоматического регулирования влажности.



4.4. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ В ЭЛЕМЕНТАХ АППАРАТУРЫ

В элементах аппаратуры имеют место следующие случаи переноса влаги.

1. Влагопоглощающий материал элемента с одной стороны имеет сцепленную с ним металлическую подложку, а с другой стороны контактирует с воздухом окружающей среды; расчетная схема такого элемента изображена на рис. 4.8.

В этом случае влагообмен материала происходит только через поверхность A контакта этого материала с воздухом окружающей среды. В зависимости от соотношения влажности воздуха и влажности материала происходит либо увлажнение последнего, т. е. пары воды адсорбируются поверхностью A и затем диффундируют в глубь в материал, либо его осушение. Указанные процессы происходят до наступления динамического равновесия между влажностью воздуха и влажностью материала.

Металлическая подложка влагонепроницаема и не поглощает влаги, поэтому на границе материал — металл массовый расход влаги q_b всегда будет равен нулю.

В большинстве случаев конструкции деталей с влагопоглощающими материалами таковы, что в них толщина стенки гораздо меньше высоты и ширины. Поэтому в расчетах, в первом приближении, такие конструкции можно считать плоскими стенками, толщина влагопоглощающего материала в которых равна средней толщине b стенок реальной конструкции, а площадь F поверхности влагообмена A равна фактической площади влагообмена.

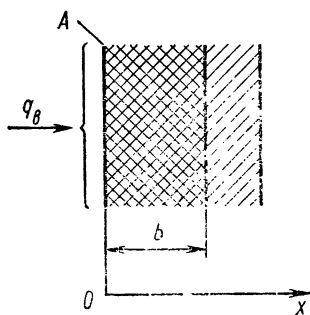


Рис. 4.8. Расчетная схема при влагообмене элемента с одной стороны

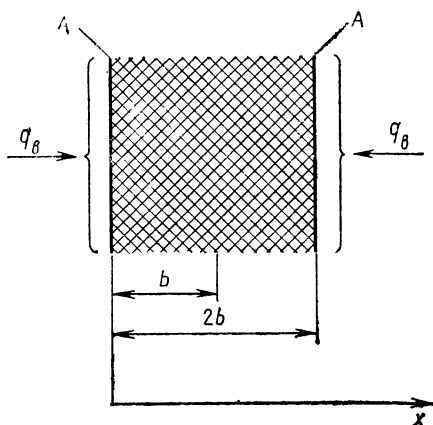


Рис. 4.9. Расчетная схема при влагообмене элемента с двух сторон

2. Влагопоглощающий материал элемента с обеих сторон контактирует с воздухом окружающей среды (рис. 4.9).

В этом случае влагообмен материала с окружающей средой происходит с обеих сторон. При одинаковых условиях влагообмена, т. е. при одинаковой влажности воздуха на обеих границах влагообмен будет происходить симметрично. Через среднее сечение стенки в силу симметрии массовый расход влаги равен нулю.

Такие конструкции можно считать плоскими стенками, толщина влагопоглощающего материала $2b$ которых равна средней толщине стенок реальной конструкции, а площадь $2F$ поверхности влагообмена A равна фактической площади влагообмена.

3. Влагопоглощающий материал элемента является защитным (влагозащитным) барьером, отгораживающим защищаемый внутренний объем V_0 с элементами Ξ_1 от окружающей среды (рис. 4.10).

Через стенку влага проникает во внутреннюю поверхность и в общем случае увлажняет как воздух внутреннего объема, так и находящиеся там элементы.

Для этих конструкций массовый расход влаги $q_{в2}$ на внутренней поверхности не равен нулю и расчет влагообмена должен проводиться на основе взаимодействия процессов проникновения влаги через стенку и увлажнения ею стенки, внутреннего защищаемого объема и элементов (см. 5.7).

Указанные случаи 1 и 2 с точки зрения методики расчета процессов влагообмена являются одинаковыми. Действительно, принимая за основу расчета случай 2, когда толщина стенки равна $2b$, видим, что он эквивалентен случаю 1 при толщине стенки b .

Случаи 1, 2 и 3 являются типичными; ниже рассмотрен процесс влагообмена для этих случаев.

4.5. ВЛАГООБМЕН ПЛОСКОЙ СТЕНКИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ. КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

При рассмотрении этой задачи необходимо для каждого конструктивного элемента из влагопоглощающего материала знать следующие параметры: концентрацию влаги и ее изменение по толщине и во времени, т. е. $c=c(x, \tau)$; массовый расход влаги и его изменение по сечению и во времени, т. е. $q_v=q_v(x, \tau)$; общее количество влаги, заключенной в стенке конструктивного элемента и его изменение во времени, т. е. $M=M(\tau)$.

Анализ влагопоглощения проведем на основе расчетной схемы (рис. 4.11), соответствующей случаям 1 и 2 диффузии влаги в элементы.

Эта расчетная схема соответствует следующим условиям: неограниченная пластина равномерной толщины $2b$ с обеих сторон подвер-

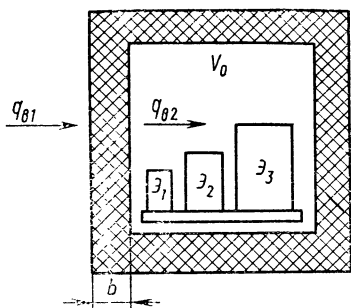


Рис. 4.10. Расчетная схема стенки — влагозащитного барьера

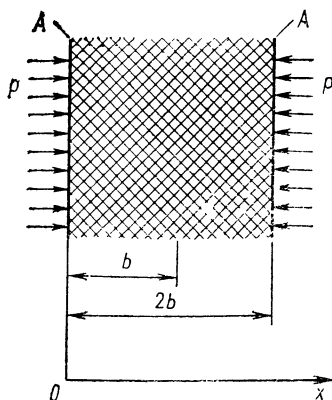


Рис. 4.11. Расчетная схема влагопоглощения плоской стенкой

гается непрерывному воздействию влажного воздуха с давлением водяных паров p ; к моменту времени $\tau \leq 0$ в пластине существовало известное заданное распределение концентрации влаги $c_0(x)$; в момент времени $\tau = 0$ давление водяных паров изменилось скачком от p_0 до p_1 .

Изменение давления скачком от p_0 до p_1 принимается потому, что процессы диффузии в стенке идут гораздо медленнее, чем процессы изменения давления водяных паров.

Будем считать, что процессы диффузии в пластине происходят при постоянной температуре, поэтому коэффициенты P , D , h для материала можно считать постоянными.

Начальные и граничные условия таковы: к моменту времени $\tau = 0$ поверхности A стенки имели концентрацию влаги $c_0 = h p_0$, соответствующую давлению p_0 ; в момент $\tau = 0$ вследствие изменения скачком давления до значения p_1 концентрация влаги в поверхностном слое A также изменится скачком до соответствующего значения c_1 ; при $\tau = 0$ вследствие разности концентрации влаги на поверхности A и внутри стенки начинается диффузионное перемещение влаги.

Решение аналогичных задач применительно к диффузии приведено в ряде работ, например в работе [2]. Поэтому можно было бы, по крайней мере, для некоторых из искомых $c(x, \tau)$, $q(x, \tau)$, $M(\tau)$ не делать промежуточных выкладок и использовать полностью полученные решения. Однако в процессе решения задачи делается целый ряд допущений и накладываются различные ограничения. Поэтому ниже рассмотрены не только результат, но и последовательность решения, и в необходимых случаях обсуждаются обоснованность и закономерность принимаемых допущений.

Исходное дифференциальное уравнение для концентрации влаги

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial \tau} \quad (4.15)$$

Решение этого уравнения рассмотрим для наиболее распространенного частного случая, характеризующегося равномерным распределением $c(x, 0) = c_0$, при этом начальная концентрация влаги по всей толщине b одинакова и равна $c_0 = h p_0$. При $\tau = 0$ давление паров воды в воздухе изменяется скачком от p_0 до p_1 и концентрация влаги в поверхностных слоях A изменяется скачком от c_0 до c_1 .

Для указанных начальных и граничных условий решение уравнения (4.15) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{c - c_1}{c_0 - c_1} = \beta_c = \\ = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-(n\pi/2)^2 Fo} \sin \frac{n\pi x}{2b}, \end{aligned} \quad (4.16)$$

где Fo — критерий Фурье для влагообмена, определяемый по следующей формуле:

$$Fo = D\tau/b^2. \quad (4.17)$$

На графиках β_c для нескольких глубин x (рис. 4.12) видно, что выравнивание концентраций по всей толщине стенки практически заканчивается при достижении $Fo \geq 1,5$, т. е., учитывая выражение

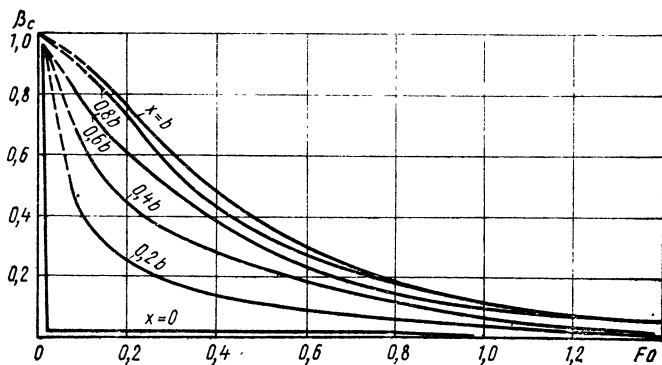


Рис. 4.12. График $\beta_c = f(Fo)$

(4.17), получим время установления динамического равновесия по влаге между воздухом и стенкой

$$\tau_{др} \geq 1,5b^2/D. \quad (4.18)$$

Массовый расход влаги q_b через площадь F (F — площадь одной стороны стенки) на заданной глубине x получим на основе выражения (4.6):

$$q_b = -DF(\partial c/\partial x). \quad (4.19)$$

Вычислим $\partial c/\partial x$ из (4.16):

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{2(c_0 - c_1)}{b} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} e^{-(n\pi/2)^2 Fo} \cos \frac{n\pi x}{2b}, \quad (4.20)$$

Из уравнений (4.19), (4.20) получим

$$q_b(x, \tau) = DF(c_1 - c_0) \frac{2}{b} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(n\pi/2)^2 Fo} \cos \frac{n\pi x}{2b}, \quad n=1, 3, 5, \dots \quad (4.21)$$

Как следует из уравнения (4.21) и рис. 4.13, $q_b(0, 0) \rightarrow \infty$ и $q_b(2b, 0) \rightarrow \infty$, т. е. на поверхностях A ($x=0, x=2b$) в начальный момент времени $\tau=0$ массовые расходы принимают бесконечно большие

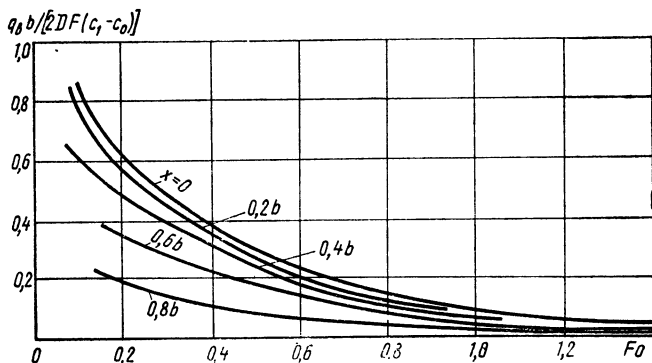


Рис. 4.13. График $q_b b / [2DF(c_1 - c_0)] = f(Fo)$

значения, что противоречит физике явлений. Такое аналитическое решение получено потому, что в момент времени $\tau=0$ принимается скачок концентраций c на поверхностях A от c_0 до c_1 . В реальных условиях бесконечно большого q_b быть не может.

При быстром изменении влажности воздуха от p_0 до p_1 значение q_b фактически будет ограничиваться процессом установления динамического равновесия между влажностью воздуха и концентрацией влаги в поверхностных слоях А ($x=0$; $x=2b$); время установления этого равновесия хотя и мало ($10^{-4} \dots 10^{-7}$ с), но оно конечно, а не равно нулю, как принято в аналитической форме.

С учетом изложенного на графике q_b (см. рис. 4.13) не указаны значения относительного расхода при $Fo < 0,1$, поскольку их вычисление по (4.21) для малых τ противоречит физическому смыслу.

Суммарную массу влаги M_b , прошедшую через площадь F на глубине x за промежуток времени $0 \dots \tau$, получим интегрированием $q_b(x, \tau)$ за этот промежуток времени.

Итак,

$$M_b(x, \tau) = \int_0^{\tau} q_b(x, \tau) d\tau. \quad (4.22)$$

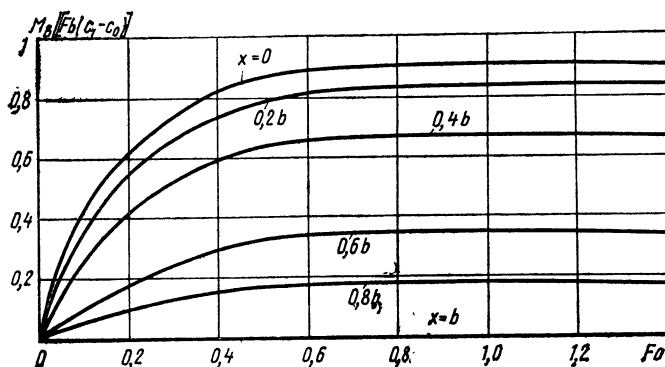


Рис. 4.14. График $M_b / [Fb(c_1 - c_0)] = f(Fo)$

Из соотношений (4.21) и (4.22) получим (рис. 4.14):

$$M_b(x, \tau) = Fb(c_1 - c_0) \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} [1 - e^{-(n\pi/2)^2 Fo}] \cos \frac{n\pi x}{2b}, \quad n=1, 3, 5, \dots \quad (4.23)$$

Таким образом, соотношения (4.16), (4.21), (4.23), являющиеся основными в классической теории [2], описывают влагообмен стенки только в одном частном случае — при скачкообразном изменении давления паров воды на границе стенки. В большинстве же практических задач влагообмен стенки с окружающей средой происходит

при переменных параметрах последней; классическая теория влагообмена не дает решения для этих случаев.

Ниже, в 4.6 и 4.7 изложена полученная нами теория влагообмена стенки с окружающей средой при переменных параметрах среды [6, 13].

4.6. ВЛАГООБМЕН ПЛОСКОЙ СТЕНКИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ. ПРИБЛИЖЕННЫЕ РЕШЕНИЯ

Полученные выше соотношения для β_c , q_b , M_b представляют собой сходящиеся ряды из бесконечной суммы членов. Анализ этих соотношений показывает, что во всех решениях наибольший удельный вес приходится на первый член суммы. В связи с этим целесообразно упростить полученные решения, оставив в них только первый член суммы. Проводя упрощения, оценим допускаемую при этом погрешность и укажем область применимости приближенного решения; множители при упрощении надо взять такие, которые учитывают всю сумму ряда.

Имея в виду, что $p \rightarrow 1$

$$\frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \dots \right) \rightarrow \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\pi}{4} = 1 \text{ при } n=1, 3, 5, \dots$$

и ряд

$$\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} \rightarrow \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\pi^2}{8} = 1 \text{ при } n=1, 3, 5, \dots$$

в приближенных формулах следует вместо множителей $4/\pi$ и $8/\pi^2$ принять множитель, равный 1.

Оставляя в (4.16) только первый член и заменяя $4/\pi$ на 1, получим

$$\frac{c_n - c_1}{c_0 - c_1} = \beta_{cn} = e^{-\frac{\pi^2}{4} Fo \sin \frac{\pi x}{2b}}, \quad (4.24)$$

где c_n , β_{cn} — соответственно приближенные концентрация влаги и отношение разности концентраций.

Расчеты показывают, что при $Fo > 0,2$ обе формулы дают практически одинаковые результаты (погрешность не более 1%); поэтому при $Fo > 0,2$ можно пользоваться выражением (4.24) вместо (4.16).

Уравнение (4.24) описывает дефицит концентрации влаги в относительных единицах; для расчетов необходимо также и уравнение концентрации $s(x, \tau)$.

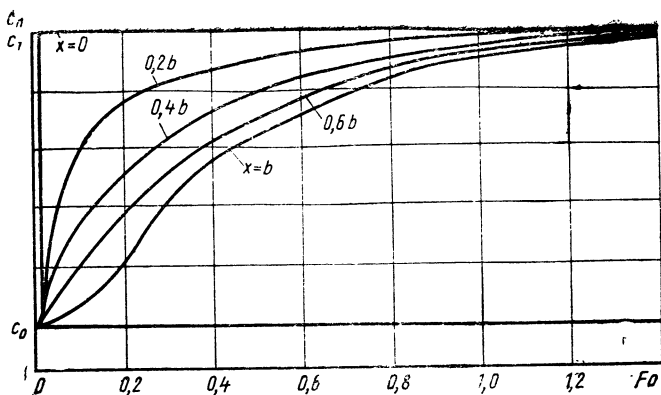


Рис. 4.15. Графики $c_n(x, Fo)$

Из уравнения (4.24) после преобразования получим

$$c_n = c_0 + (c_1 - c_0) \left(1 - e^{-\frac{\pi^2}{4} \frac{D\tau}{b^2} \sin \frac{\pi x}{2b}} \right). \quad (4.25)$$

Уравнение (4.25) — экспонента (рис. 4.15), введем для нее величину

$$T_n = 4b^2 / (\pi^2 D), \quad (4.26)$$

где T_n — приближенная постоянная времени увлажнения стенки, с. Используя соотношение (4.26), получим из уравнения (4.25)

$$c_n = c_0 + (c_1 - c_0) \left(1 - e^{-\tau/T_n \sin \frac{\pi x}{2b}} \right). \quad (4.27)$$

Уравнение (4.27) представляет собой экспоненту; видно, что увлажняющаяся стенка, с точки зрения теории автоматического регулирования, представляет собой апериодическое звено первого порядка с постоянной времени T_n .

Оставляя в выражении (4.21) только первый член суммы, и используя (4.26), получим

$$q_{в.п} = DF(c_1 - c_0) \frac{2}{b} e^{-\tau/T_n \cos \frac{\pi x}{2b}}. \quad (4.28)$$

Расчеты показывают, что при $Fo > 0,3$ точная формула (4.21) и приближенная (4.28) дают практически одинаковые результаты (погрешность не более 1%).

Оставляя в выражении (4.23) только первый член суммы и заменяя множитель $8/\pi^2$ на 1, получим

$$M_{в.п} = Fb(c_1 - c_0) (1 - e^{-\tau/T_p}) \cos \frac{\pi x}{2b}. \quad (4.29)$$

Расчеты показывают, что при $Fo > 0,2$ и $x=0$ обе формулы дают практически одинаковые результаты (погрешность не более 2%); сечение $x=0$ представляет наибольший интерес, так как именно через него проходит вся влага в стенку.

Обычно в прикладных задачах значения $c_{п.}$, $q_{в.п.}$ и $M_{в.п.}$ надо знать не в любых сечениях x , а на границах, т. е. при $x=0$ и $x=b$. Так, концентрация влаги $c_{п.}$ на границах стенки будет

$$c_{п.}(0, \tau) = c_1;$$

$$c_{п.}(b, \tau) = c_0 + (c_1 - c_0) (1 - e^{-\tau/T_p}). \quad (4.30)$$

Массовый расход влаги $q_{в.п.}$ на границах будет

$$q_{в.п.}(0, \tau) = \frac{2DF}{b} (c_1 - c_0) e^{-\tau/T_p}; \quad q_{в.п.}(b, \tau) = 0. \quad (4.31)$$

Значения суммарного количества влаги, прошедшей через границы, будут

$$M_{в.п.}(0, \tau) = Fb(c_1 - c_0) (1 - e^{-\tau/T_p}); \quad M_{в.п.}(b, \tau) = 0. \quad (4.32)$$

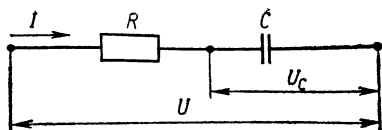
Следует подчеркнуть, что приведенные выше уравнения получены только для одного частного случая нестационарного влагообмена, а именно при скачкообразном изменении концентрации влаги в поверхностном слое от c_0 до c_1 . Во многих прикладных задачах чаще встречаются случаи, когда концентрация влаги в граничном слое изменяется непрерывно; теория этих более важных для практики случаев рассмотрена ниже.

4.7. ВЛАГООБМЕН ПЛОСКОЙ СТЕНКИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ СРЕДЫ

Общей задачей влагообмена плоской стенки с окружающей средой является следующая: определить зависимость параметров c , q_v и M_v во времени при непрерывном, но известном заданном изменении влажности окружающей среды.

Ниже изложено решение этой общей задачи, полученное на основе аналогии между процессами в электрической цепи и увлажняемой стенке.

Рис. 4.16. Электрическая RC-цепь



Для электрической цепи из последовательно соединенных резистора R и конденсатора C (рис. 4.16) имеем [24])

$$U = T_3 \frac{dU_C}{d\tau} + U_C; \quad (4.33)$$

$$I = C \frac{dU_C}{d\tau}; \quad (4.34)$$

$$Q_3 = CU_C, \quad (4.35)$$

где U , U_C — напряжения соответственно в цепи и на конденсаторе, В; $T_3 = RC$ — электрическая постоянная времени цепи, с; I — сила тока, А; Q_3 — накапливаемый на конденсаторе заряд, Кл.

Увлажняемую стенку представим моделью, состоящей из комбинации влажностного резистора R_B и влажностного конденсатора V_B , соединенных последовательно (рис. 4.17); эта модель аналогична электрической RC-цепи (см. рис. 4.16).

В реальной увлажняемой стенке, в ее наружном поверхностном слое 1, контактирующем с окружающей средой, всегда давление паров влаги p_H будет в равновесии с давлением водяных паров окружающей среды p_B , при этом всякие изменения p_B мгновенно отслеживаются p_H , т. е. для слоя 1 всегда выполняется условие $p_H(\tau) = p_B(\tau)$. Давление же паров влаги по толщине и по времени будет переменным, и какое-то распределение этого давления по толщине и во времени зависит как от коэффициента диффузии D и толщины b стенки, так и от закона изменения влажности окружающей среды $p_B(\tau)$.

В предложенной нами модели увлажняемой стенки (см. рис. 4.17), в ее наружном поверхностном слое 1 также всегда будет $p_H(\tau) = p_B(\tau)$. Давление же паров влаги по толщине стенки в данный момент времени будем считать одинаковым, обозначим его p_M (давление паров в материале стенки) и отнесем к поверхностному слою 2, т. е. давление паров влаги $p_M(\tau)$ в материале модели стенки зависит только от времени τ и совпадает с давлением паров влаги в поверхностном слое 2.

Для такой модели стенки по аналогии с выражением (4.33) получим

$$p_H = T \frac{dp_M}{d\tau} + p_M; \quad c_H = T \frac{dc_M}{d\tau} + c_M; \quad (4.36)$$

$$T = R_B V_B, \quad (4.37)$$

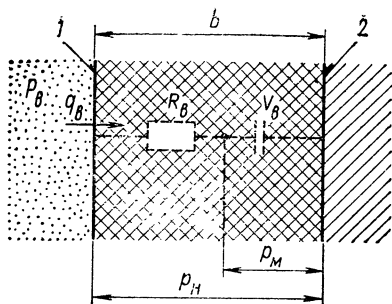


Рис. 4.17. Модель увлажняемой стенки

где p_H — давление паров влаги в наружном поверхностном слое 1, контактирующем с окружающей средой, Па; p_M — давление паров влаги в поверхностном слое 2; оно же — эквивалентное давление па-

ров влаги внутри всей стенки, Па; c_H, c_M — концентрация влаги соответственно в слоях 1 и 2, кг/м³; T — влажностная постоянная времени стенки, с; R_B — влажностное сопротивление стенки, м⁻¹·с⁻¹; V_B — влажностная емкость стенки, м·с².

Величины R_B и V_B определяются параметрами стенки:

$$R_B = \frac{b}{2hDF} = \frac{b}{2PF}, \quad (4.38)$$

$$V_B = Fbh = Vh, \quad (4.39)$$

где V — объем стенки, м³.

Необходимо отметить, что R_B модели стенки различно для установившихся и неуставившихся процессов. Для процессов установившихся, т. е. когда через стенку от слоя 1 к слою 2 (см. рис. 4.17) непрерывно происходит постоянный массовый расход влаги q_B , вся влага проходит полностью через стенку, и для этого случая R_B должно вычисляться, как приведено в табл. 4.2:

$$R_B = \frac{b}{PF} = \frac{b}{hDF}. \quad (4.40)$$

При процессах неуставившихся часть всей влаги, поступающей в стенку через слой 1 по направлению к слою 2, по пути поглощается материалом стенки, поэтому общее влажностное сопротивление стенки R_B будет вдвое меньше, чем полученное по формуле (4.40); для этих процессов R_B вычисляют по соотношению (4.38).

Для вычисления q_B модели стенки по аналогии с (4.34) получим:

$$q_B = V_B \cdot \frac{dp_M}{d\tau} = \frac{T}{R_B} \cdot \frac{dp_M}{d\tau} = \frac{T}{h_M R_B} \cdot \frac{dc_M}{d\tau}, \quad (4.41)$$

где q_B — массовый расход влаги через наружный поверхностный слой 1, кг/с.

По аналогии с уравнением (4.22) получим для M_B

$$M_B = \int_0^{\tau} q_B d\tau = V_B p_M = V c_M. \quad (4.42)$$

Принятая модель является приближенной, но приемлемой для технических расчетов. Так, влажностная постоянная времени T стенки у этой модели в соответствии с (4.37)

$$T = \frac{b}{2hDF} Fbh = \frac{b^2}{2D} . \quad (4.43)$$

Сравнивая выражения для T по (4.43) и для T_{Π} по (4.26), видим, что они имеют одинаковую структуру и отличаются только постоянными множителями, различающимися примерно на 20%.

Преимущества принятой модели заключаются в том, что она позволяет решать различные динамические задачи, т. е. задачи при переменных во времени p_n и c_n .

Пригодность принятой модели подтверждается ниже сравнением решений задач, полученных на основе «точной» классической теории и принятой модели.

Принимая эту модель за рабочую, рассмотрим методику решения нестационарных задач и определим основные соотношения влагообмена для плоской влагопоглощающей стенки.

Для этой стенки исходными являются уравнения (4.36), (4.38), (4.39), (4.41) — (4.43); в этих уравнениях значения p_n и c_n изменяются (задаются) во времени в соответствии с условиями задачи, т. е. $p_n(\tau)$ и $c_n(\tau)$; необходимо определить $p_m(\tau)$, $c_m(\tau)$, $q_b(\tau)$, $M_b(\tau)$.

Для решения этой задачи в оригиналах, т. е. посредством решения дифференциальных уравнений, надо проинтегрировать уравнения (4.36) при известном (заданном) законе изменения $p_n(\tau)$ или $c_n(\tau)$; в результате получим $p_m(\tau)$ или $c_m(\tau)$. По полученному $c_m(\tau)$, используя (4.41) и (4.42), определим $q_b(\tau)$ и $M_b(\tau)$. Однако этот метод решения трудоемок и, главное, возможен только для ограниченного класса задач (например, при $c_n = \text{const}$), так как дифференциальное уравнение (4.36) для любых $p_n(\tau)$ или $c_n(\tau)$ в замкнутой форме не интегрируется.

Для решения таких задач применим преобразование Лапласа, что позволяет решить широкий круг практических задач.

Уравнение (4.36), преобразованное по Лапласу [16], т. е. в изображениях, будет иметь вид

$$c_n(s) = c_m(s) (Ts + 1) . \quad (4.44)$$

Передаточная функция $W_c(s)$ для концентрации влаги $c_m(s)$, определенная из уравнения (4.44), имеет вид

$$W_c(s) = \frac{c_m(s)}{c_n(s)} = \frac{1}{Ts + 1} , \quad (4.45)$$

а ее структурная схема изображена на рис. 4.18.

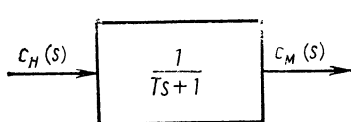


Рис. 4.18. Структурная схема $W_c(s)$ для концентрации влаги

Определим передаточную функцию для $q_B(s)$.

Из уравнения (4.36), разделив его на hR_B , получим

$$\frac{c_H}{hR_B} = \frac{T}{hR_B} \frac{dc_M}{d\tau} + \frac{c_M}{hR_B} = q_B + \frac{c_M}{hR_B}. \quad (4.46)$$

Уравнение (4.46) в изображениях имеет вид:

$$\frac{c_H(s)}{hR_B} = q_B(s) + \frac{c_M(s)}{hR_B}. \quad (4.47)$$

Передаточная функция $W_q(s)$ для $q_B(s)$ из (4.47) будет

$$W_q(s) = \frac{q_B(s)}{c_H(s)} = \frac{1}{hR_B} \frac{c_H(s) - c_M(s)}{c_H(s)}. \quad (4.48)$$

Учитывая (4.45), после преобразований получим из уравнения (4.48):

$$W_q(s) = \frac{q_B(s)}{c_H(s)} = \frac{1}{hR_B} \frac{Ts}{Ts+1}. \quad (4.49)$$

Структурная схема $W_q(s)$ изображена на рис. 4.19.

Для вычисления передаточной функции для $M_B(s)$ используем выражения (4.42) и (4.45); после преобразований получим

$$M_B(s) = Vc_M(s) = Vc_H(s)W_c(s),$$

откуда

$$W_M(s) = \frac{M_B(s)}{c_H(s)} = VW_c(s) = V \frac{1}{Ts+1}. \quad (4.50)$$

Структурная схема $W_M(s)$ изображена на рис. 4.20.

Сравним решения, полученные на основе предложенной модели, с приближенными решениями, выведенными на основе классической теории.

Пусть стенка при $\tau < 0$ имела по всей толщине b равновесную с окружающей средой концентрацию влаги c_0 . В момент времени $\tau = 0$ концентрация влаги в поверхностном слое изменилась скачком от c_0 до c_1 и далее, при $\tau > 0$ оставалась постоянной, равной c_1 ; определим закон изменения $c_M(\tau)$, $q_B(\tau)$, $M_B(\tau)$.

Обозначим приращение концентрации влаги через Δc_H ; имеем

$$\Delta c_H = c_1 - c_0. \quad (4.51)$$

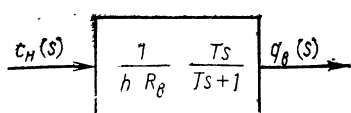


Рис. 4.19. Структурная схема $W_q(s)$ для расхода влаги

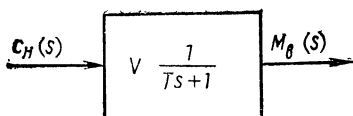


Рис. 4.20. Структурная схема $W_m(s)$ для суммарного количества поглощенной влаги

Из выражения (4.44) определим $\Delta c_m(s)$:

$$\Delta c_m(s) = \frac{\Delta c_H}{s} \cdot \frac{1}{Ts+1}. \quad (4.52)$$

По изображению (4.55) получим оригинал [16]

$$\Delta c_m = \Delta c_H (1 - e^{-\tau/T}). \quad (4.53)$$

Полученное Δc_m является приращением концентрации влаги (так как через Δc_H обозначено также приращение концентрации в поверхностном слое); учитывая (4.51) и (4.53), получим

$$c_m = c_0 + (c_1 - c_0) (1 - e^{-\tau/T}). \quad (4.54)$$

Из выражения (4.49) определим

$$q_B s = \frac{\Delta c_H(s)}{h R_B} \cdot \frac{Ts}{Ts+1} = \frac{\Delta c_H}{h R_B} \cdot \frac{T}{Ts+1}. \quad (4.55)$$

По изображению (4.55) получим оригинал [16]

$$q_B = \frac{\Delta c_H}{h R_B} e^{-\tau/T} = \frac{(c_1 - c_0) 2DF}{b} e^{-\tau/T}. \quad (4.56)$$

Из выражения (4.50) определим

$$M_B(s) = V \Delta c_H(s) \cdot \frac{1}{Ts+1} = V \Delta c_H \cdot \frac{1}{s(Ts+1)}. \quad (4.57)$$

По изображению (4.57) получим оригинал [16]

$$M_B = V \Delta c_H (1 - e^{-\tau/T}) = Fb(c_1 - c_0) (1 - e^{-\tau/T}). \quad (4.58)$$

Сравнивая (4.54) с (4.30), (4.56) с (4.31) и (4.58) с (4.32), видим, что решения, полученные на основе предложений модели, совпадают с приближенными решениями, полученными на основе классической теории. Это дает основание считать данную модель работо-

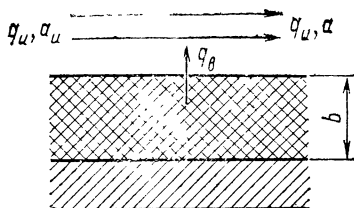


Рис. 4.21. Обдув стенки потоком воздуха

способной; на ее основе ниже рассмотрено решение более сложных нестационарных задач.

4.8. ТЕОРИЯ ВЛАГООБМЕНА ДЛЯ ТИПОВЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ

Многие процессы влагообмена элементов, узлов и приборов с окружающей средой с точки зрения теории влагообмена могут быть приведены к одной из указанных ниже типовых задач или к их комбинации.

Задача 1. Обдув стенки потоком воздуха. Пусть влагопоглощающая стенка площадью F и толщиной b обдувается потоком воздуха, направленным параллельно стенке (рис. 4.21). При этом в зависимости от соотношения влажности стенки и влажности обдувающего воздуха будет происходить осушение или увлажнение стенки; для определенности будем рассматривать процесс осушения стенки сухим воздухом. Поток осушающего воздуха от источника сухого воздуха имеет на входе стенки объемный расход q_n и абсолютную влажность воздуха a_n ; $q_n = \text{const}$, $a_n = \text{const}$.

Стенка через поверхностный слой отдает влагу с массовым расходом q_v в поток воздуха; влага (пары воды) смешивается в потоке и на выходе поток воздуха имеет объемный расход q_n и абсолютную влажность a ; $a > a_n$. Принято равенство входного и выходного объемных расходов воздуха q_n , так как добавка в поток воздуха паров влаги с расходом q_v увеличивает только влажность потока и практически не увеличивает q_n , поскольку по объему относительная доля водяных паров в воздухе мала (это справедливо при $q_n \gg q_m$, где q_m — объемный расход влаги из стенки через поверхностный слой, приведенный к абсолютной влажности окружающего воздуха).

Начальная концентрация влаги в материале стенки равномерна и равна c_{m0} . Этой концентрации соответствовала бы равновесная влажность a_0 окружающей среды (воздуха). Между a_0 и c_{m0} в соответствии с выражением (4.2) имеется связь

$$c_{m0}/h_m = a_0/h_v. \quad (4.59)$$

Если обдувающий воздух имеет $a_n < a_0$, то будет осушение стенки, а если $a_n > a_0$ — увлажнение стенки.

Найдем сначала $a(\tau)$, затем, зная $a(\tau)$, и, учитывая, что эквива-

летная концентрация влаги в поверхностном слое стенки $c(\tau)$ связана с $a(\tau)$ уравнением

$$a/h_B = c_M/h_M, \quad (4.60)$$

определим и $c_M(\tau)$.

Поскольку масса влаги в потоке воздуха на выходе равна сумме массы влаги в потоке на входе и массы влаги, отдаваемой стенкой, то уравнение влагообмена в потоке воздуха таково:

$$q_H a_H d\tau + q_B d\tau = q_H a d\tau, \quad (4.61)$$

где q_H — объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$; q_B — массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$; a , a_H — абсолютная влажность воздуха, соответственно в потоке и от источника, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Из уравнения (4.61) имеем

$$a = a_H + q_B/q_H, \quad (4.62)$$

или в операторной форме при $a_H = \text{const}$ и $q_H = \text{const}$ получим из уравнения (4.62)

$$a(s) = \frac{a_H}{s} + \frac{1}{q_H} q_B(s). \quad (4.63)$$

В соответствии с выражением (4.49)

$$q_B(s) = \frac{\Delta c_H(s)}{h_M R_B} \frac{T_s}{T_s + 1}, \quad (4.64)$$

где

$$\Delta c_H = c_{M0} - c_M = \frac{h_M}{h_B} (a_0 - a)$$

и при $a_0 = \text{const}$

$$\Delta c_H(s) = \frac{h_M a_0}{h_B s} - \frac{h_M}{h_B} a(s). \quad (4.65)$$

Учитывая (4.64) и (4.65), получим из уравнения (4.63)

$$a(s) = \frac{U(s)}{sW(s)}, \quad (4.66)$$

где

$$U(s) = T(a_H + \kappa_1 a_0)s + a_H;$$

$$W(s) = T(\kappa_1 + 1)s + 1, \quad W'(s) = T(\kappa_1 + 1).$$

По изображению (4.66) найдем оригинал; получим [16]

$$a(\tau) = \frac{U(0)}{W(0)} + \frac{U(s_1)}{s_1 W'(s_1)} e^{s_1 \tau}, \quad (4.67)$$

$$\text{где } s_1 - \text{корень } W(s)=0; s_1 = -\frac{1}{T(\kappa_1+1)}. \quad (4.68)$$

После преобразований из (4.67) с учетом (4.68) получим

$$a(\tau) = a_n - \left(a_n - \frac{a_n + \kappa_1 a_0}{\kappa_1 + 1} \right) e^{-\frac{\tau}{T(\kappa_1+1)}}, \quad (4.69)$$

где

$$\kappa_1 = \frac{1}{q_n h_B R_B} = \frac{2DFh_M}{q_n b h_B},$$

$T = b^2/(2D)$ — влажностная постоянная времени стенки, с;
 h_M, h_B — коэффициенты растворимости влаги в материале стенки и в воздухе, $\text{с}^2/\text{м}^2$.

Учитывая уравнение (4.60), получим из (4.69):

$$c_M(\tau) = \frac{h_M}{h_B} \left(a_n - \left[a_n - \frac{a_n + \kappa_1 a_0}{\kappa_1 + 1} \right] e^{-\frac{\tau}{T(\kappa_1+1)}} \right). \quad (4.70)$$

Уравнения (4.69) и (4.70) описывают закон изменения абсолютной влажности воздуха a обдувающего потока на выходе стенки и эквивалентной концентрации влаги в стенке c_M (рис. 4.22).

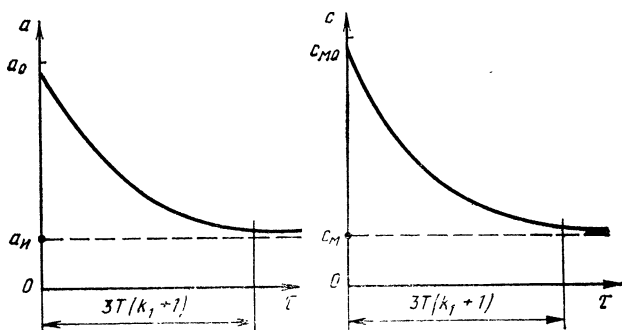


Рис. 4.22. Зависимости $a(\tau)$ и $c(\tau)$ при осушении стенки потоком воздуха

Поскольку исходное уравнение влагообмена (4.61) справедливо и для $a_n > a_0$, т. е. при обдуве сухой стенки влажным потоком воздуха, то решения (4.69) и (4.70) будут верны и для этого случая, только в них $a_n > a_0$ (рис. 4.23).

Полученные решения показывают, что время T_w установления

равновесного состояния по влажности между стенкой и обдувающим ее потоком составляет

$$T_w \approx 3T(k_1 + 1), \quad (4.71)$$

где

$$k_1 = \frac{2DF}{q_n b} \frac{h_m}{h_B} = \frac{q_m}{q_n}; \quad (4.72)$$

$$q_m = \frac{2DF}{b} \frac{h_m}{h_B}, \quad (4.73)$$

q_m — объемный расход влаги из стенки через поверхностный слой, приведенный к абсолютной влажности окружающего воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$.

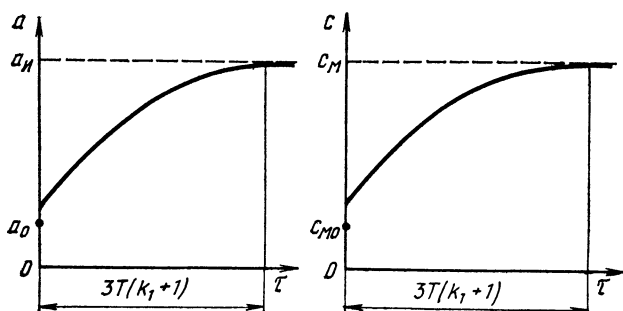


Рис. 4.23. Зависимости $a(\tau)$ и $c(\tau)$ при увлажнении стенки потоком воздуха

Здесь величина q_m — это постоянная каждой стенки, она характеризует объемный расход влаги из стенки в воздух и зависит только от свойств материала стенки (D , h_m) и ее конструктивной формы (F , b).

Уменьшить время T_w можно снижением k_1 , т. е. увеличением расхода воздуха q_n от источника; однако и при $q_n \gg q_m$ время T_w нельзя сделать менее $3T$. Физически это означает, что при постоянной температуре скорость процесса осушения или увлажнения стенки даже при очень больших расходах обдувающего стенку воздуха лимитируется диффузией паров влаги в материале стенки.

Справедливость полученных уравнений (4.69) и (4.70) можно подтвердить проверкой, если вычислить общее количество влаги M_B , передаваемой стенкой в поток воздуха за время $\tau = 0 \dots \infty$,

$$M_B = \int_0^{\infty} q_n a d\tau - \int_0^{\infty} q_n a_n d\tau.$$

Этот интеграл вычислим, взяв $a(\tau)$ из выражения (4.69):

$$M_B = Fb \frac{h_M}{h_B} (a_0 - a_n). \quad (4.74)$$

Указанная в правой части выражения (4.74) величина представляет собой изменение влагосодержания стенки, находившейся в равновесном состоянии с воздухом, имевшим влажности a_0 и a_n .

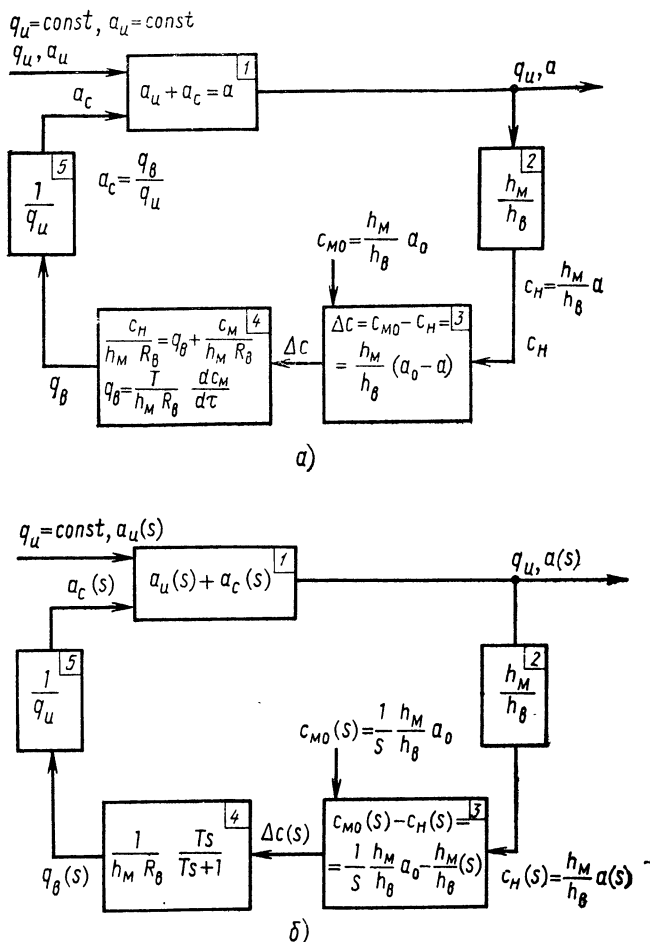


Рис. 4.24. Структурная схема процесса влагообмена между стенкой и обдувающим ее потоком воздуха; сушка стенки:

а — в оригиналах; б — в изображениях; 1 — смешивание паров воды в обдуваемом потоке; 2 — равновесие между концентра-

цией влаги c_n в поверхностном наружном слое и влажностью потока a ; 3 — разность концентраций влаги в стенке между начальной концентрацией c_{m0} и поверхностной c_n ; 4 — влагоотдача с расходом q_b из стенки в поток воздуха; 5 — абсолютная влажность a_c , добавляемая стенкой в поток воздуха

В теории систем регулирования принято процессы и системы изображать в форме структурных схем; эти схемы строят в оригиналах (рис. 4.24, а) и в изображениях (рис. 4.24, б).

Пользуясь структурной схемой в изображениях, несложно получить описание процесса в операторной форме. Так, для структуры, показанной на рис. 4.24, б, имеем следующие соотношения (при $q_n = \text{const}$):

$$a_n(s) + a_c(s) = a(s);$$

$$a_c(s) = \frac{1}{q_n} \cdot \frac{1}{h_m R_b} \cdot \frac{T_s}{T_s + 1} \left[\frac{1}{s} \cdot \frac{h_m}{h_b} a_0 - \frac{h_m}{h_b} a(s) \right];$$

$$a_n(s) + \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{q_n} \cdot \frac{1}{h_b R_b} a_0 \frac{T_s}{T_s + 1} = a(s) \left[1 + \frac{1}{q_n} \cdot \frac{1}{h_b R_b} \cdot \frac{T_s}{T_s + 1} \right].$$

Учитывая соотношение (4.72), получим

$$a(s) \left[1 + k_1 \frac{T_s}{T_s + 1} \right] = a_n(s) + \frac{k_1 a_0}{s} \cdot \frac{T_s}{T_s + 1}. \quad (4.75)$$

Уравнение (4.75) справедливо для $q_n = \text{const}$ и любом законе изменения $a_n(\tau)$; при $a_n = \text{const}$ получим из (4.75)

$$a(s) \left[1 + k_1 \frac{T_s}{T_s + 1} \right] = \frac{a_n}{s} + \frac{k_1 a_0}{s} \cdot \frac{T_s}{T_s + 1}. \quad (4.76)$$

После преобразований из уравнения (4.76) получим

$$a(s) = \frac{U(s)}{sW(s)}, \quad (4.77)$$

где

$$U(s) = T(a_n + k_1 a_0)s + a_n,$$

$$W(s) = T(k_1 + 1)s + 1.$$

Как видно, уравнение (4.77) совпадает с уравнением (4.66), что и должно быть, если (4.75) решить для случая $q_n = \text{const}$, $a_n = \text{const}$; обратное преобразование (4.77) дает уравнение (4.69) для оригинала $a(\tau)$.

Задача 2. Кузов с аппаратурой внутри продувается сухим воз-

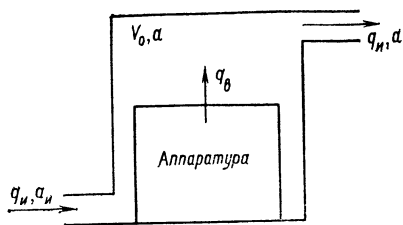


Рис. 4.25. Схема продувки кузова с аппаратурой

духом. Начальные условия. Объем воздуха в кузове V_0 ; начальная абсолютная влажность воздуха в кузове a_0 ; аппаратура внутри кузова по влагопоглощению эквивалентна плоской стенке с площадью F , толщиной b , коэффициентом диффузии влаги D и коэффициентом растворимости влаги в материале стенки h_m .

Продувка ведется воздухом с объемным расходом $q_{и}$ и абсолютной влажностью $a_{и}$, при этом воздух в кузове перемешивается полностью (рис. 4.25). В начальном состоянии аппаратура имеет концентрацию влаги, равновесную с воздухом влажностью a_0 . Необходимо определить изменение во времени абсолютной влажности воздуха в кузове.

Если $a_{и} < a_0$, то продувка ведет к высушиванию воздуха в кузове и высушиванию аппаратуры; если $a_{и} > a_0$, то происходит увлажнение воздуха внутри кузова и увлажнение аппаратуры (например, при натекании влажного воздуха снаружи). При продувке воздух в кузов поступает через входные люки, а выходит через выходные люки и щели; при перетекании воздух в кузов входит и выходит через щели. При смешивании воздуха влажность его будет меняться, в связи с чем аппаратура начнет обмениваться влагой с этим смешанным воздухом; в результате всех этих процессов будет постепенно изменяться как влажность воздуха a внутри кузова, так и концентрация влаги в стенках аппаратуры.

Основное уравнение процесса влагообмена получим из рассмотрения баланса влаги в воздухе внутри кузова:

$$q_{и}a_{и}d\tau + q_{\theta}d\tau - q_{и}ad\tau = V_0da. \quad (4.78)$$

В левой части уравнения (4.78) первый член определяет количество влаги, поступающей с продуваемым воздухом, второй — количество влаги, выходящей из аппаратуры при ее сушке, третий — количество влаги, уходящей в вытекающем потоке воздуха; правая часть уравнения описывает изменение влагосодержания объема воздуха V_0 .

Из уравнения (4.78) после преобразований получим:

$$a_{и} + \frac{q_{\theta}}{q_{и}} - a - \frac{V_0}{q_{и}} \frac{da}{d\tau} = 0. \quad (4.79)$$

Уравнение (4.79) непосредственно проинтегрировать нельзя, так

как q_B является сложной функцией, зависящей от s_H , т. е. в конечном счете зависящей от a , что и следует из выражений (4.36), (4.44), (4.46) и (4.47).

Запишем уравнение (4.79) в изображениях, имея в виду, что $a_H = \text{const}$, $q_H = \text{const}$:

$$\frac{a_H}{s} + \frac{1}{q_H} q_B(s) - a(s) - \frac{V_0}{q_H} s a(s) + \frac{V_0}{q_H} a_0 = 0. \quad (4.80)$$

Как показано в выражениях (4.64) и (4.65), величина $q_B(s)$ имеет вид

$$q_B(s) = \frac{\frac{1}{s} \frac{h_M}{h_B} a_0 - \frac{h_M}{h_B} a(s)}{h_M R_B} \frac{T s}{T s + 1}, \quad (4.81)$$

где $T = b^2/(2D)$ — влажностная постоянная времени аппаратуры (эквивалентной стенки).

Введем величину

$$N = V_0/q_H, \quad (4.82)$$

где N — постоянная времени продувки объема при расходе q_H продуваемого воздуха, с.

Учитывая уравнения (4.81), (4.82) и (4.72), получим из (4.80)

$$a(s) = \frac{U(s)}{sW(s)}, \quad (4.83)$$

где $U(s) = N T a_0 s^2 + [T(a_H + \kappa_1 a_0) + N a_0] s + a_H$;

$$W(s) = N T s^2 + [T(\kappa_1 + 1) + N] s + 1;$$

$$\kappa_1 = \frac{1}{q_H h_M R_B} \frac{h_M}{h_B} = \frac{2 D F h_M}{q_H b h_B}.$$

Зная изображение (4.83), проведем обратное преобразование Лапласа и вычислим оригинал

$$a(\tau) = \frac{U(0)}{W(0)} + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=2} \frac{U(s_\kappa)}{s_\kappa W'(s_\kappa)} e^{s_\kappa \tau}, \quad (4.84)$$

где s_κ — корни s_1 и s_2 уравнения $W(s) = 0$.

Запишем уравнение (4.84) в развернутой форме:

$$\begin{aligned} a(\tau) = & \frac{U(0)}{W(0)} + \frac{U(s_1)}{s_1 W'(s_1)} e^{s_1 \tau} + \\ & + \frac{U(s_2)}{s_2 W'(s_2)} e^{s_2 \tau}. \end{aligned} \quad (4.85)$$

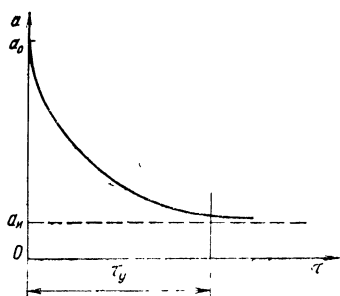


Рис. 4.26. Зависимость $a(\tau)$ при продувке кузова с аппаратурой

В задачах продувки параметры T , N и k_1 всегда будут положительными, поэтому корни s_1 и s_2 всегда будут действительными отрицательными числами; в связи с этим $a(\tau)$ представляет собой сумму

двух спадающих экспонент (рис. 4.26).

Время τ_y достижения равновесного по влажности состояния, т. е. время продувки, в течение которого влажность воздуха, и аппаратуры в кузове станет равновесной с влажностью вдуваемого воздуха a_n , составляет

$$\tau_y \geq 3/S_{\min}, \quad (4.86)$$

где s_{\min} — корень s_1 или s_2 , меньший по модулю.

Пользуясь структурной схемой в изображениях (рис. 4.27), составим в операторной форме уравнения процесса влагообмена при любых a_n , в том числе и при $a_n = f(\tau)$ (заметим, что выше уравнение (4.80) рассматривалось только при $a_n = \text{const}$).

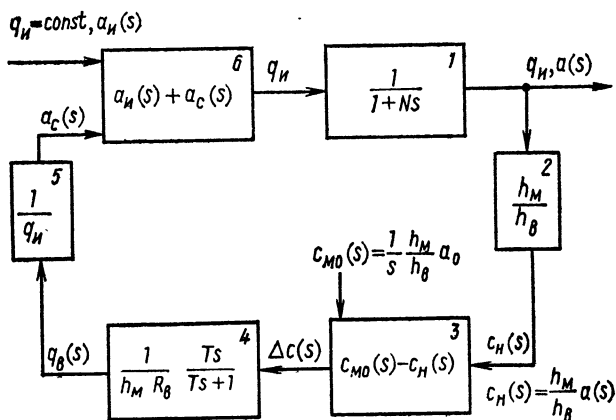


Рис. 4.27. Структурная схема (в изображениях) процесса продувки кузова с аппаратурой

Учитывая ненулевые начальные условия, получим

$$a_n(s) + a_c(s) = a(s) (1 + Ns) - Na_0;$$

$$a_c(s) = \frac{1}{q_n} \frac{1}{h_m R_b} \frac{Ts}{Ts+1} \left[\frac{1}{s} \frac{h_m}{h_b} a_0 - \frac{h_m}{h_b} a(s) \right];$$

$$\kappa_1 = \frac{1}{q_n R_b h_b},$$

откуда

$$a(s) = \frac{a_n(s) (Ts+1) + NTa_0s + \kappa_1 Ta_0 + Na_c}{NTs^2 + [T(\kappa_1+1) + N]s + 1}. \quad (4.87)$$

Уравнение (4.87) является более общим, чем уравнение (4.80), так как оно справедливо при любых $a_n(\tau)$, т. е. оно справедливо и при переменной влажности a_n вдуваемого воздуха. В частном случае, при $a_n = \text{const}$, из уравнения (4.87) получим уравнение (4.83).

Сравнивая структурную схему, приведенную на рис. 4.27, со структурной схемой, показанной на рис. 4.24, б, видим, что рис. 4.27 отличается от рис. 4.24, б наличием звена с передаточной функцией

$$W_N(s) = \frac{1}{Ns+1}, \quad (4.88)$$

где величина N , вычисляемая по формуле (4.82), характеризует процесс смешивания воздуха объема V_0 с воздухом, вдуваемым с расходом q_n .

Таким образом, в структуре, приведенной на рис. 4.27, имеются две инерционности, влияющие на динамику изменения $a(\tau)$:

инерционность T , характеризующая диффузию влаги в стенке аппаратуры;

инерционность N , характеризующая смешивание продуваемого воздуха с воздухом объема V_0 .

Во многих реальных задачах N гораздо меньше T , поэтому в таких случаях можно влияние N не учитывать и тогда схема, приведенная на рис. 4.27, превращается в схему, показанную на рис. 4.24, б, а уравнение (4.84) заменяется уравнением (4.69).

Задача 3. Увлажнение аппаратуры, находящейся в герметизирующей оболочке. Начальные условия. Во внутреннем объеме герметизирующей влагопоглощающей оболочки толщиной b размещена аппаратура A (рис. 4.28), которая, в свою очередь, имеет также влагопоглощающую глухую стенку толщиной b_a .

В общем случае внутри объема V_0 находится также влагопоглотитель в патроне (мешочке) Π , который поглощает влагу, проникающую через оболочку O .

В задачах подобного рода необходимо получить зависимость кон-

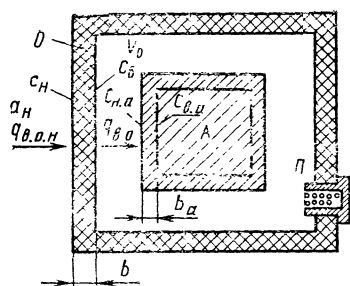


Рис. 4.28. Конструктивная схема аппаратуры в герметизирующей оболочке с влагопоглощающим патроном П

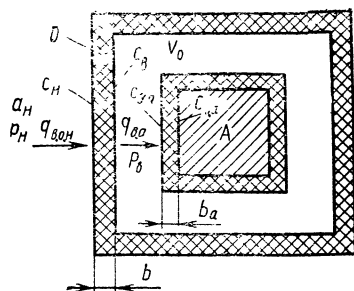


Рис. 4.29. Конструктивная схема аппаратуры в герметизирующей оболочке без влагопоглощающего патрона

центрации влаги в заданных зонах (например, концентрацию на наружной стенке аппаратуры) в функции времени.

Если для простоты рассмотрения принять начальную концентрацию влаги в герметизирующей оболочке, внутри объема и в стенке аппаратуры одинаковой и нулевой, то при внешнем воздействии воздуха влажностью a_n влага начнет постепенно проникать внутрь, увлажняя оболочку и аппаратуру; наличие влагопоглотителя П «растянет» во времени процесс увлажнения аппаратуры А.

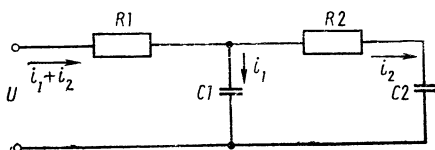
Различные частные случаи герметизации и хранения аппаратуры относятся к рассматриваемой задаче, только при этом учитываются или не учитываются некоторые параметры; например, при сравнительно малой толщине b оболочки О по сравнению с b_a (герметизирующие пленочные оболочки) можно не учитывать накопление влаги в этой оболочке (но при этом обязательно учитывается ее влажностное сопротивление); при малом влагопоглощении аппаратурой А по сравнению с влагопоглощением патрона П можно не учитывать влагопоглощение аппаратурой.

Сначала рассмотрим процессы влагообмена аппаратуры, находящейся в герметизирующей оболочке и схематично изображенной на рис. 4.29; накопление влаги в воздухе объема V_0 не учитывается, а влагопоглощающего патрона нет.

Для решения этой задачи рассмотрим сначала ее электрический аналог, схема которого показана на рис. 4.30. Как видно из сравнения рис. 4.29 и 4.30, имеем следующие аналогии: влажностное сопротивление $R_{в,о}$ оболочки аналогично сопротивлению резистора R1, влагоемкость $V_{в,о}$ оболочки аналогична емкости конденсатора C1, влажностное сопротивление $R_{в,а}$ стенок аппаратуры аналогично сопротивлению резистора R2, влагоемкость $V_{в,а}$ аппаратуры аналогична емкости конденсатора C2. Напряжение U на входе аналогично

давлению паров влаги $p_n = c_n/h$ на наружной стороне оболочки, напряжение U_{c1} на конденсаторе $C1$ аналогично давлению паров влаги $p_v = c_v/h$ на внутренней стенке оболочки (это же давление паров влаги является усредненным давлением паров влаги по всей толщине оболочки).

Рис. 4.30. Схема электрического аналога процесса увлажнения аппаратуры



Обычно h и h_a различны, тогда

$$c_{n,a} = c_v (h_a/h).$$

Таким образом, напряжение U_{c1} аналогично c_v/h и $c_{n,a}/h_a$, а напряжение U_{c2} аналогично давлению паров влаги $p_{v,a} = c_{v,a}/h_a$ на внутренней стороне стенки аппаратуры.

Ток $i_1 + i_2$ через $R1$ аналогичен расходу $q_{в.о.н}$ влаги на входе в оболочку, ток i_1 (ток через конденсатор $C1$) аналогичен расходу, идущему на увлажнение оболочки; ток i_2 (ток через $R2$ и $C2$) аналогичен расходу $q_{в.а.}$, идущему на увлажнение стенок аппаратуры.

Для электрической схемы (см. рис. 4.30) имеем следующие уравнения:

$$i_1 = C_1 (dU_{C1}/d\tau); \quad (4.89)$$

$$i_2 = C_2 (dU_{C2}/d\tau); \quad (4.90)$$

$$\frac{dU_{C1}}{d\tau} = R_2 C_2 \frac{d^2 U_{C2}}{d\tau^2} + \frac{dU_{C2}}{d\tau}; \quad (4.91)$$

$$U = T_1 T_2 \frac{d^2 U_{C2}}{d\tau^2} + T \frac{dU_{C2}}{d\tau} + U_{C2}, \quad (4.92)$$

где

$$T_1 = R_1 C_1; \quad T_2 = R_2 C_2;$$

$$T = T_1 (1 + \kappa) + T_2; \quad \kappa = C_2/C_1. \quad (4.93)$$

Уравнение (4.92) в оригиналах преобразуем в уравнение в изображениях, получим

$$U(s) = U_{C2}(s) [T_1 T_2 s^2 + Ts + 1], \quad (4.94)$$

откуда

$$U_{C2}(s) = U(s) \frac{1}{T_1 T_2 s^2 + Ts + 1}. \quad (4.95)$$

Для схемы (см. рис. 4.30) имеем также

$$U_{C1} = U_{C2} + T_2 \frac{dU_{C2}}{d\tau} . \quad (4.96)$$

По оригиналу (4.96), используя (4.95), получим изображение для $U_{C1}(s)$:

$$U_{C1}(s) = U(s) \frac{T_2 s + 1}{T_1 T_2 s^2 + T s + 1} . \quad (4.97)$$

Зная заданный характер изменения напряжения на входе, т. е. $U(\tau)$, можно по уравнениям (4.95) и (4.97) определить значения $U_{C2}(s)$ и $U_{C1}(s)$ и затем, проведя обратное преобразование Лапласа, определить $U_{C2}(\tau)$ и $U_{C1}(\tau)$.

Для частного случая $U(\tau) = U_0 = \text{const}$, т. е. для скачкообразного изменения входного напряжения, получим

$$U_{C2}(s) = \frac{U_0}{s(T_1 T_2 s^2 + T s + 1)} , \quad (4.98)$$

$$U_{C1}(s) = \frac{U_0(T s + 1)}{s(T_1 T_2 s^2 + T s + 1)} . \quad (4.99)$$

Учитывая аналогию электрических и влажностных процессов для систем, изображенных на рис. 4.29 и 4.30, получим по аналогии с (4.95) и (4.97) для концентрации влаги следующие зависимости для параметров процесса влагообмена в системе (см. рис. 4.29):

$$\frac{c_{в.а}(s)}{h_a} = \frac{c_n(s)}{h(T_{в.о} T_{в.а} s^2 + T s + 1)} , \quad (4.100)$$

$$\frac{c_b(s)}{h} = \frac{c_{н.а}(s)}{h_a} = \frac{c_n(s)(T_{в.а} s + 1)}{h(T_{в.о} T_{в.а} s^2 + T s + 1)} , \quad (4.101)$$

где

$$T_{в.о} = R_{в.о} V_{в.о} = \frac{b}{2D_0 F_0 h} F_0 b h = \frac{b^2}{2D_0} ,$$

$$T_{в.а} = R_{в.а} V_{в.а} = \frac{b_a}{2D_a F_a h_a} F_a b_a h_a = \frac{b_a^2}{2D_a} ,$$

$$T = T_{в.о}(1+k) + T_{в.а}, \quad k = \frac{V_{в.а}}{V_{в.о}} = \frac{F_a b_a h_a}{F_0 b h} .$$

Расходы влаги на внешней и внутренней стороне оболочки определим по аналогии с током i_1 (4.89) и i_2 (4.90).

Поскольку накопления влаги в объеме V_0 нет, то расход $q_{в.о}$ влаги, выходящей с внутренней стенки оболочки, равен расходу $q_{в.а}$ вла-

ги, входящей в стенку аппаратуры А, и эквивалентен току i_2 ; расход влаги $q_{в.о.н}$, входящей из окружающей среды во внешнюю стенку оболочки, эквивалентен сумме токов i_1 и i_2 .

Из уравнений (4.89) и (4.90) получим

$$i_1(s) = C_1 s U_{C1}(s); \quad (4.102)$$

$$i_2(s) = C_2 s U_{C2}(s). \quad (4.103)$$

По аналогии с выражениями (4.102) и (4.103) получим для $q_{в.о}$ и $q_{в.о.н}$

$$q_{в.о}(s) = \frac{h_a}{h} \frac{F_a b_a s c_H(s)}{T_{в.о} T_{в.а} s^2 + Ts + 1}; \quad (4.104)$$

$$q_{в.о.н}(s) = \frac{F_0 b s c_H(s) (T_{в.а} s + 1)}{T_{в.о} T_{в.а} s^2 + Ts + 1} + \frac{h_a}{h} \frac{F_a b_a s c_H(s)}{T_{в.о} T_{в.а} s^2 + Ts + 1}. \quad (4.105)$$

Уравнения (4.100), (4.101), (4.104) и (4.105) дают возможность при любых заданных значениях $c_H(\tau)$ определить концентрацию и расход влаги в характерных зонах оболочки и аппаратуры. Для наиболее часто встречающегося случая $c_H(\tau) = c_H = \text{const}$ уравнения (4.100), (4.101), (4.104) и (4.105) примут вид:

$$c_{в.а}(s) = \frac{h_a}{h} \frac{c_H}{s(T_{в.о} T_{в.а} s^2 + Ts + 1)}; \quad (4.106)$$

$$c_{в}(s) = \frac{c_H (T_{в.а} s + 1)}{s(T_{в.о} T_{в.а} s^2 + Ts + 1)}; \quad (4.107)$$

$$c_{н.а}(s) = \frac{h_a}{h} \frac{c_H (T_{в.а} s + 1)}{s(T_{в.о} T_{в.а} s^2 + Ts + 1)}; \quad (4.108)$$

$$q_{в.о}(s) = \frac{h_a}{h} \frac{c_H F_a b_a}{T_{в.о} T_{в.а} s^2 + Ts + 1}; \quad (4.109)$$

$$q_{в.о.н}(s) = \frac{c_H F_0 b (T_{в.а} s + 1)}{T_{в.о} T_{в.а} s^2 + Ts + 1} + \frac{h_a}{h} \frac{c_H F_a b_a}{T_{в.о} T_{в.а} s^2 + Ts + 1}. \quad (4.110)$$

В рассмотренной задаче учтено накопление влаги и в самой оболочке, и в стенке аппаратуры. На практике применяются также тонкостенные оболочки (пленки), накоплением влаги в которых ввиду их малой толщины можно пренебречь; ниже рассмотрена эта задача.

Задача 4. Увлажнение аппаратуры, находящейся в тонкой герметизирующей оболочке. Конструктивная схема, иллюстрирующая эту задачу, изображена на рис. 4.31. К этой задаче относятся случаи, когда герметизирующая оболочка имеет малую толщину (оболочка — пленка).

Герметизирующая оболочка имеет параметры: F , b , D , h . Аппаратура имеет параметры: F_a , b_a , D_a , h_a , $c_{а.0}$ — начальную равномерную по толщине b_a концентрацию влаги.

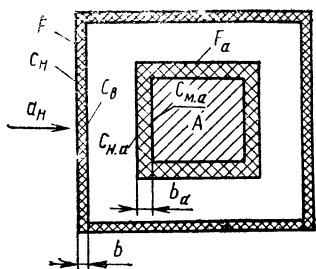


Рис. 4.31. Конструктивная схема аппарата в тонкой герметизирующей оболочке

При решении задачи, т. е. при определении $c_{na}(\tau)$, не будем учитывать накопление влаги в стенке оболочки и в объеме воздуха внутри оболочки, так как оно мало по сравнению с накоплением влаги в стенке

аппаратуры b_a (размер b , по крайней мере, на порядок меньше размера b_a).

Снаружи на оболочку действует окружающий воздух с абсолютной влажностью $a_n(\tau)$. При воздействии a_n в оболочке на ее наружной стороне будет концентрация влаги $c_n(\tau)$; на внутренней стороне оболочки будет концентрация влаги $c_v(\tau)$; при этом в соответствии с выражением (4.2)

$$c_n = a_n(h/h_v).$$

Положим, что $c_n(\tau) > c_{a,o}$, т. е. происходит постепенное увлажнение стенки b_a аппарата за счет диффузионного проникновения влаги через оболочку.

Учитывая отсутствие накопления влаги в стенке оболочки и воздухе, получим уравнения влагообмена

$$q_{v,o} = q_{v,a}, \quad q_{v,o}(s) = q_{v,a}(s), \quad (4.111)$$

где $q_{v,o}$ — расход влаги через оболочку; $q_{v,a}$ — расход влаги через наружную сторону стенки b_a .

Выразим $q_{v,o}(s)$ и $q_{v,a}(s)$ через параметры оболочки и стенки аппарата. На основании (4.13) получим

$$q_{v,o}(s) = \frac{c_n(s) - c_v(s)}{Rh}, \quad (4.112)$$

где $R = b/(hDF)$ — влажностное сопротивление оболочки при стационарном процессе прохождения влаги (без ее накопления).

На основании уравнения (4.49) с учетом начальной концентрации $c_{a,o}$ получим

$$q_{v,a}(s) = \frac{c_{na}(s)}{R_a h_a} - \frac{T_a s}{T_a s + 1} - \frac{c_{a,o}}{s R_a h_a} - \frac{T_a s}{T_a s + 1}, \quad (4.113)$$

где

$$T_a = b_a^2 / (2D_a), \quad R_a = b_a / (2D_a F_a h_a).$$

Учитывая, что

$$c_B = (h/h_a) c_{H.a}, \quad c_B(s) = (h/h_a) c_{H.a}(s),$$

получим из (4.112)

$$q_{B.o}(s) = \frac{c_H(s)}{Rh} - \frac{c_{H.a}(s)}{Rh_a}. \quad (4.114)$$

Из выражений (4.111), (4.113) и (4.114) после преобразований получим

$$c_{H.a}(s) = \frac{h_a}{h} c_H(s) \frac{T_a s + 1}{T_a(k+1)s + 1} + \frac{c_{a.o}}{s} \frac{k T_a s}{T_a(k+1)s + 1}, \quad (4.115)$$

где

$$k = \frac{2bD_a F_a h_a}{b_a D F h}. \quad (4.116)$$

Для случая $a_H = \text{const}$ и $c_H = \text{const}$, т. е. при ступенчатом изменении влажности окружающего воздуха, получим для $c_{H.a}(s)$ из (4.115)

$$c_{H.a}(s) = \frac{h_a c_H (T_a s + 1) + h c_{a.o.} k T_a s}{h s [T_a(k+1)s + 1]}. \quad (4.117)$$

Выполнив для (4.117) обратное преобразование Лапласа, получим (для $c_H = \text{const}$)

$$c_{H.a}(\tau) = \frac{h_a}{h} c_H - \frac{k}{k+1} \left(\frac{h_a}{h} c_H - c_{a.o.} \right) e^{-\frac{\tau}{T_a(k+1)}}. \quad (4.118)$$

Концентрации влаги c_H и $c_{a.o.}$ связаны с влажностью воздуха соотношениями

$$c_H = a_H \frac{h}{h_B}; \quad c_{a.o.} = a_{H0} \frac{h_a}{h_B}; \quad c_{H.a} = a \frac{h_a}{h_B},$$

учитывая эти соотношения, получим из уравнения (4.118)

$$a(\tau) = a_H - \frac{k}{k+1} (a_H - a_{H0}) e^{-\frac{\tau}{T_a(k+1)}}. \quad (4.119)$$

График $a(\tau)$ для этого случая приведен на рис. 4.32.

Основное назначение оболочки — увеличить продолжительность влагозащиты, т. е. «растянуть» во времени увеличение влажности воздуха а внутри оболочки, для этого необходимо увеличить коэффициент k , определяемый уравнением (4.116). При увеличении этого

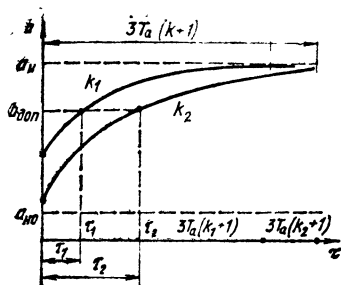


Рис. 4.32. Зависимость $a(\tau)$ при увлажнении аппаратуры

коэффициента от k_1 до k_2 время роста влажности до допустимого уровня $a_{\text{доп}}$ увеличивается.

Заметим, что полученное выше решение справедливо

как для случая $a_{H0} < a < a_H$, так и для случая $a_{H0} > a > a_H$, т. е. оно описывает как процесс увлажнения, так и процесс осушения аппаратуры, заключенной в тонкую герметизированную оболочку. Для случая осушения, т. е. для $a_{H0} > a > a_H$, целесообразно уравнение (4.119) записать в виде

$$a(\tau) = a_H + \frac{k}{k+1} (a_{H0} - a_H) e^{-\frac{\tau}{T_a(k+1)}}; \quad (4.120)$$

график $a(\tau)$ для этого случая изображен на рис. 4.33.

Для определения концентрации влаги $c_{м.а}$ на внутренней стороне стенки b_a необходимо использовать уравнение (4.44)

$$c_{м.а}(s) = c_{н.а}(s) \frac{1}{T_a s + 1}.$$

Используя затем уравнение (4.115) или для частного случая $c_H = \text{const}$ уравнение (4.117), получим в операторной форме уравнение $c_{м.а}(s)$. Однако при обратном преобразовании Лапласа даже для случая $c_H = \text{const}$ уравнение для $c_{м.а}(\tau)$ получается в общем ви-

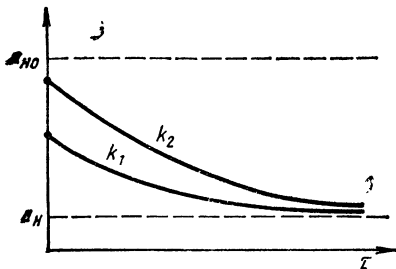


Рис. 4.33. Зависимость $a(\tau)$ при осушении аппаратуры

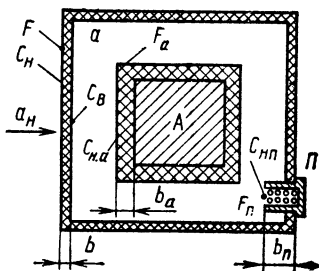


Рис. 4.34. Конструктивная схема аппаратуры и влагопоглотителя в тонкой герметизирующей оболочке

де очень громоздким и трудно обозримым, поэтому здесь его не приводим. При определении $c_{м.а}(t)$ для конкретного случая эту задачу сначала необходимо решить в общем виде для $c_{н.а}(s)$ и затем, используя (4.44), уже в численной форме должна решаться задача сначала для $c_{м.а}(s)$ и затем для $c_{м.а}(t)$.

Задача 5. Увлажнение аппаратуры, снабженной влагопоглотителем и находящейся в тонкой герметизирующей оболочке. Схеме, приведенной на рис. 4.34, аналогичны схемы, рассмотренные в задаче 4, только здесь внутри загерметизированного объема находится влагопоглотитель (например, патрон П с силикагелем).

Как и при рассмотрении задачи 4, здесь также не будем учитывать накопление влаги в стенке оболочки и в воздухе внутри оболочки.

В гл. 5 показано, что влагопоглощающие свойства патрона П однозначно определяются его параметрами F_n, b_n, D_n, h_n , аналогичными по структуре параметрам плоской стенки.

При воздействии окружающего воздуха с влажностью $a_n(t)$ влага диффузионно через оболочку будет поступать внутрь и поглощаться патроном П и аппаратурой А, при этом постепенно будет увеличиваться влажность воздуха а. Для упрощения решения будем считать, что начальная влажность (концентрация влаги) аппаратуры и влагопоглотителя равна нулю.

Герметизирующая оболочка имеет параметры F, b, D, h ; а аппаратура — параметры F_a, b_a, D_a, h_a .

Уравнения влагообмена

$$q_{в.о} = q_{в.а} + q_{в.п}, \quad q_{в.о}(s) = q_{в.а}(s) + q_{в.п}(s), \quad (4.121)$$

где $q_{в.о}$ — расход влаги через оболочку; $q_{в.а}$ и $q_{в.п}$ — расходы влаги через наружную сторону стенок соответственно аппаратуры и патрона.

Выразим $q_{в.о}(s)$, $q_{в.а}(s)$ и $q_{в.п}(s)$ через параметры оболочки, аппаратуры и патрона. Аналогично уравнениям (4.112) и (4.113) и имея нулевые начальные условия, получим

$$q_{в.о}(s) = \frac{c_n(s) - c_b(s)}{Rh} = - \frac{c_n(s)}{Rh} \frac{hc_{н.а}(s)}{Rh_a}, \quad (4.122)$$

$$q_{в.а}(s) = \frac{c_{н.а}s}{R_a h_a} \frac{T_a s}{T_a s + 1}, \quad (4.123)$$

$$q_{в.п}(s) = \frac{c_{н.п}(s) T_n s}{R_n h_n (T_n s + 1)} = \frac{c_{н.а}(s) T_n s}{R_n h_a (T_n s + 1)}, \quad (4.124)$$

$$\begin{aligned} \text{где } R_a &= \frac{b_a}{2D_a F_a h_a}, \quad R = \frac{b}{DFh}, \quad R_n = \frac{b_n}{2D_n F_n h_n}, \quad T_a = \\ &= \frac{b_a^2}{2D_a^2}, \quad T_n = \frac{b_n^2}{2D_n^2}. \end{aligned}$$

Решив уравнение (4.121) относительно $c_{н.а}(s)$ с учетом (4.122) — (4.124), получим

$$c_{н.а}(s) = \frac{c_n(s) R_n h_n R_a h_a (T_a s + 1) (T_n s + 1)}{R_a h R_n h_n (T_a s + 1) (T_n s + 1) + R h R_n h_n T_a s (T_n s + 1) + \dots \rightarrow} \dots \leftarrow \frac{+ R h R_a h_n T_n s (T_n s + 1)}{.} \quad (4.125)$$

Уравнение (4.125) и является решением задачи 5 в операторной форме.

Получив в численном виде решение для $c_{н.а}(\tau)$, вычислим $a(\tau)$:

$$a(\tau) = (h_b/h_a) c_{н.а}(\tau). \quad (4.126)$$

Таким образом, уравнение (4.126) описывает процесс изменения влажности воздуха внутри оболочки для рассматриваемого случая.

Рассмотренные выше три расчетных схемы увлажнения (осушения) аппаратуры (см. рис. 4.29, 4.31 и 4.34) охватывают большинство практически возможных случаев увлажнения аппаратуры, находящейся в герметизирующей оболочке.

Определяющими факторами, влияющими на процесс увлажнения среды внутри оболочки, являются влажностное сопротивление оболочки R и накопление влаги в оболочке, аппаратуре A и влагопоглотителе $П$. При этом во всех случаях необходимо учитывать R ; что же касается учета накопления влаги, то следует сначала оценить значение влажностной емкости оболочки Vh , аппаратуры $V_a h_a$ и патрона $V_n h_n$, сравнить их между собой и в зависимости от их соотношения некоторые из них можно не учитывать.

5.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Эксплуатация передвижной аппаратуры, а также длительное хранение блоков, приборов и устройств стационарной аппаратуры (ЗИП, ожидание монтажа и т. п.) происходят в условиях, когда относительная влажность атмосферного воздуха выше влажности, необходимой для аппаратуры.

В гл. 1 было показано, что при контакте элементов аппаратуры с окружающим их воздухом на поверхности элементов при относительной влажности воздуха $\varphi > 60\%$ возникает жидкая пленка влаги, толщина которой резко увеличивается с ростом φ ; показано также, что при $\varphi < 60\%$ жидкая пленка влаги на поверхности элементов не образуется.

В гл. 2 было показано, что существенное понижение надежности аппаратуры при ее контакте с воздухом происходит именно тогда, когда $\varphi > 60\%$ и образующаяся на поверхности элементов влага в виде жидкой пленки вызывает появление физических процессов, существенно ухудшающих основные параметры аппаратуры.

Как указано в табл. 1.4, средняя годовая относительная влажность воздуха φ для большинства географических районов СССР составляет 78...85%, при этом средние суточная и месячная относительные влажности достигают 80...88%. Поэтому непосредственный контакт такого воздуха с элементами вызывает появление на поверхности элементов жидкой пленки влаги, что и ведет к понижению надежности работы аппаратуры.

В процессе эксплуатации аппаратура находится либо в режиме функционирования, либо в выключенном состоянии (хранение, ремонт, обслуживание, перерывы между очередными включениями); назовем этот режим режимом хранения.

В режиме функционирования аппаратуры в каждом из ее элементов выделяется теплота, которая подогревает воздух, окружающий элемент. Если этот воздух поступил из атмосферы и при контакте с элементами подогрелся не менее чем на 8...10 °С, то его относительная влажность снижается до $\varphi < 60\%$, т. е. происходит самоподсушка воздуха, что существенно снижает вредное воздействие влажного воздуха окружающей среды на функционирующую аппаратуру.

В режиме хранения аппаратуры ее элементы теплоту не выделяют, а следовательно, не происходит и самоподсушка воздуха, поэтому элементы аппаратуры, если не приняты меры для их защиты, находятся в непосредственном контакте с влажным воздухом окружающей среды, что резко снижает их надежность.

В настоящее время широко применяют различные способы защиты элементов и приборов от воздействия влажного воздуха (покрытие одних металлов другими, заливка компаундами, пропитка и покрытие лаками и красками, герметизация и др.). Хотя эти способы и позволяют обеспечить надежность на приемлемом современном уровне, однако достигается это сложными в конструктивном и технологическом отношении приемами. И тем не менее все эти способы не гарантируют от повреждения элементов и от возникновения отказов, так как все эти способы защиты от воздействия влажного воздуха являются пассивными.

Для кардинального решения вопроса защиты аппаратуры от воздействия влажного воздуха надо обеспечить **активную защиту** всех элементов и приборов и создать такие условия, чтобы за все время эксплуатации аппаратуры как в режиме функционирования, так и в режиме хранения ее элементы имели бы контакт только с сухим воздухом, имеющим относительную влажность $\varphi = 30 \dots 60\%$.

Частичная защита элементов аппаратуры от климатических воздействий, в том числе и от воздействия влажного атмосферного воздуха, обеспечивается кожухом (корпусом) этой аппаратуры, выполняющим роль герметизирующей оболочки. Такими герметизирующими оболочками являются кузов (кабина) у передвижной наземной аппаратуры, жесткие корпуса у бортовых приборов самолетов, гибкая оболочка (пленка) в таре, в которой производится хранение и консервация приборов.

Здесь следует особо подчеркнуть, что, хотя все указанные герметизирующие оболочки и предназначены для прекращения влагообмена между окружающей средой и герметизированным объемом внутри этих оболочек, задачу эту полностью они не выполняют.

Такое проникновение влаги внутрь герметизированного объема происходит двумя путями: 1) перетеканием наружного воздуха через щели в герметизирующей оболочке, вызываемым разностью давлений воздуха снаружи и внутри; эта разность давлений образуется за счет колебания температуры, колебания атмосферного давления и обдува ветром; 2) диффузионным проникновением водяных паров из наружного воздуха непосредственно через влагопроницаемый материал оболочки (например, полиэтилен), вызываемым разностью парциальных давлений водяных паров снаружи и внутри.

Сравнительный анализ показывает, что в герметизирующей оболочке, состоящей из жестких конструктивных элементов (кузов, кор-

пус, контейнер), перенос влаги в основном происходит за счет перетекания наружного воздуха через щели в оболочке (места стыков, люков, дверей, разъемов); этот перенос влаги в 10—1000 раз превышает диффузионный перенос влаги непосредственно через стенки. В герметизирующей оболочке, состоящей из гибких конструктивных элементов (упаковка в полиэтиленовые чехлы, завариваемые по контуру с последующей проверкой герметичности), щелей практически нет (нет отверстий с поперечным размером более 1 мкм); в этих оболочках перенос влаги происходит за счет диффузионного проникновения водяных паров непосредственно через стенку оболочки.

Полную или идеальную герметизацию приборов могут обеспечить только непрерывные металлические оболочки. В этом случае основной материал оболочки — металл — не пропускает через себя влагу за счет диффузии, а места стыков оболочки выполняются неразъемными (пайка, сварка). Однако такая оболочка не отвечает другим требованиям, предъявляемым к приборам (исключаются обслуживание, ремонт, регулирование, вентиляция и др.), поэтому полная герметизация приборов применяется крайне редко.

Изложенное показывает, что подавляющее большинство приборов и устройств для обеспечения активной защиты всех ее элементов от воздействия влажного воздуха требует применения способов и устройств, обеспечивающих регулирование и поддержание относительной влажности воздуха вокруг элементов аппаратуры на оптимальном по надежности уровне; в первую очередь такое регулирование должно проводиться в аппаратуре, находящейся в режиме хранения.

Ниже изложены вопросы теории и техники регулирования влажности в аппаратуре, находящейся в режиме хранения.

5.2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЛАЖНОСТИ

В гл. 2 показано, что оптимальной по надежности относительной влажностью $\varphi_{\text{опт}}$ для аппаратуры является относительная влажность воздуха 30...55%. Поскольку проникающий из окружающей среды в аппаратуру атмосферный воздух имеет относительную влажность либо выше $\varphi_{\text{опт}}$, либо равную $\varphi_{\text{опт}}$, то регулирование влажности сводится к осушению воздуха.

В настоящее время применяют следующие способы регулирования влажности: статическое осушение; динамическое осушение; подогрев воздуха; автоматическое регулирование влажности.

Статическое осушение по ГОСТ 9.103-78 — это осушение воздуха в герметизированном объеме с помощью влагопоглотителей, размещенных внутри этих объемов.

Конструктивно влагопоглотители выполняют в виде патронов, мешочков, матов, наполненных влагопоглощающим материалом.

Динамическое осушение по ГОСТ 9.103-78 — это осушение воздуха в герметизированном объеме с помощью принудительной подачи в этот объем сухого воздуха по определенной схеме. Этот способ называется также способом продувки прибора сухим воздухом.

Сухой воздух может быть заранее приготовлен и находиться в баллонах под избыточным давлением; в процессе динамического осушения воздух из баллона через редуктор, понижающий давление, подается в герметизированный объем; избыток воздуха из герметизированного объема вытекает либо через открываемые для этого люки, либо через щели в герметизирующей оболочке.

Сухой (осушенный) воздух можно получить также в осушителе воздуха непосредственно в процессе продувки герметизированного объема; осушитель воздуха в этом случае является одним из блоков прибора. Такая схема продувки, обеспечивающая непрерывное получение сухого воздуха и его использование для динамического осушения, конструктивно относительно проста и позволяет автоматизировать процесс продувки.

Продувка герметизированного объема сухим воздухом может быть либо непрерывной с постоянным или переменным расходом сухого воздуха на протяжении всего процесса хранения прибора, либо периодической; в последнем случае в процессе продувки влажность внутри его будет постепенно понижаться, а между продувками — повышаться за счет натекания наружного влажного воздуха. Управляя длительностью и интенсивностью продувки, можно обеспечить поддержание внутри объема относительной влажности $\varphi_{\text{опт}}$.

При подогреве воздуха его абсолютная влажность не изменяется, а относительная влажность уменьшается, в связи с чем подогрев воздуха используется как способ понижения его относительной влажности. Это дает возможность поддерживать относительную влажность воздуха внутри герметизированного объема ниже относительной влажности атмосферного воздуха (при их одинаковых абсолютных влажностях), если обеспечивать непрерывное превышение температуры герметизированного объема над температурой атмосферного воздуха. Сам же нагрев воздуха осуществляется либо непосредственно внутри герметизированного объема, либо вне этого объема, и затем нагретый воздух подается внутрь объема. В первом случае процесс осушения герметизированного объема подогретым воздухом может рассматриваться как частный случай способа статического осушения; во втором — как частный случай способа динамического осушения.

Автоматическое регулирование влажности в качестве способа обеспечения и поддержания внутри герметизированного объема влажности $\varphi_{\text{опт}}$ может быть реализовано на основе как статического, так и динамического осушения. Автоматическое регулирование пока еще практически не применяется, но за этим способом — будущее,

так как именно он обеспечит высокое качество поддержания влажности $\varphi_{\text{опт}}$ воздуха.

Рассматривая способы регулирования влажности, следует отметить, что, хотя некоторые из них, например статическое осушение, применяют в технике давно и широко, инженерные методы обоснования и расчета соответствующих процессов и обеспечивающих их технических приборов и устройств либо отсутствуют, либо разработаны крайне недостаточно. Это объясняется тем, что для количественного описания процессов регулирования влажности необходимы зависимости, характеризующие процесс влагообмена между элементами аппаратуры и влажным воздухом, а также перетекание воздуха через щели в оболочке.

В гл. 3 и 4 приведено аналитическое описание динамических процессов перетекания воздуха через щели оболочки и влагообмена. С учетом указанных там зависимостей, ниже даны обоснование и расчет основных параметров технических приборов, устройств и систем для регулирования влажности в блоках.

5.3. СТАТИЧЕСКОЕ ОСУШЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее общая конструктивная схема установки, в которой обеспечивается статическое осушение прибора, изображена на рис. 5.1. Прибор А, имеющий влагопоглощающие стенки элементов толщиной b_a и площадью F_a , помещен внутри герметизирующей оболочки О с объемом воздуха V_0 , имеющей толщину стенки b и площадь F контакта с окружающим воздухом. Внутри объема V_0 находится также влагопоглотитель в патроне (мешочке) П, который поглощает влагу, проникающую через оболочку О. Влага проникает двумя путями: диффузионным — непосредственно сквозь стенку оболочки О, если эта оболочка выполнена из органических материалов, и перетеканием через щель Ш, всегда имеющуюся или иногда образующуюся в оболочке О в процессе хранения.

Назначение установки — создание и поддержание в течение заданного срока хранения $\tau_{\text{хр}}$ влажности воздуха а внутри объема V_0 в интервале значений $\varphi_{\text{опт}}$.

Изменяющаяся во времени влажность воздуха а зависит от следующих факторов и свойств:

значения влажности наружного воздуха a_n и его изменения во времени;

изменений температуры, атмосферного давления наружного воздуха и действия ветра, вызывающих перетекание воздуха через щель Ш;

влагопоглощающих свойств прибора А и его начального влагосодержания;

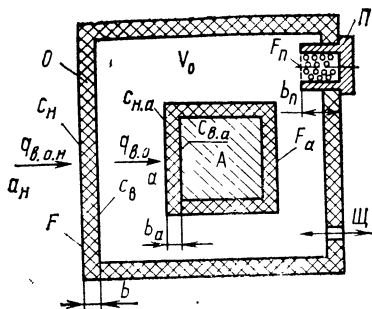


Рис. 5.1. Конструктивная схема установки для статического осушения прибора

влагопоглощающих свойств патрона и его начального влагосодержания;

влагопоглощающих свойств герметизирующей оболочки О.

В общем случае при расчете, проектировании и конструировании установки статического осушения аппаратуры необходимо учитывать все указанные факторы и свойства. Вместе с тем при разработке конкретных установок осушения в каждом частном случае можно некоторые из факторов и свойств не учитывать, поскольку либо они отсутствуют, либо их влияние относительно мало. Например, при разработке системы статического осушения с тонкостенной оболочкой О (толщина 0,15...0,3 мм) можно не учитывать накопление влаги в стенках оболочки, поскольку оно мало по сравнению с накоплением влаги в патроне; в других случаях, зная конструкцию прибора А и его влагопоглощающие свойства, можно не учитывать накопление влаги в нем по сравнению с накоплением влаги в патроне; можно рассматривать процессы в системе осушения при наличии щели Щ или при ее отсутствии и т. д.

5.4. ОЦЕНКА ПОГЛОЩЕНИЯ ВЛАГИ РАЗЛИЧНЫМИ КОНСТРУКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПРИБОРА

Прибор состоит из узлов и деталей. Каждый из этих элементов может поглощать влагу; в общем случае такое поглощение производится следующими конструктивными частями: деталями прибора, влагопоглотителем, помещенным в прибор, воздухом, находящимся во внутреннем пространстве прибора, ограниченном его корпусом (оболочкой).

Сравнительную оценку количества поглощаемой влаги проведем для некоторого усредненного прибора, имеющего следующие параметры:

объем	. . . . .	10 дм ³ ;
масса	. . . . .	10 кг;
объем воздуха внутри прибора	. . . . .	7 дм ³ ;
объем всех деталей и узлов (без воздуха)	. . . . .	3 дм ³ ;
масса влагопоглотителя-силикагеля КСК	. . . . .	50 г;
температура прибора	. . . . .	+20 °С.

Оценим поглощение влаги конструктивными частями прибора при

изменении относительной влажности воздуха в приборе от $\varphi_0=30\%$ до $\varphi_1=60\%$; будем считать, что в исходном состоянии при влажности φ_0 воздуха все детали и влагопоглотитель имеют влажность, равновесную с φ_0 . При натекании влажного воздуха в прибор через щели в его оболочке влажность воздуха внутри прибора, а также влажность деталей и влагопоглотителя будут постепенно повышаться и в какой-то момент времени достигнут 60% (для воздуха); динамика этого процесса рассмотрена в гл. 4. Будем считать, что натекание воздуха внутрь прибора происходит медленно, влажность деталей и влагопоглотителя находится в равновесном состоянии с влажностью воздуха внутри прибора.

Поглощение влаги деталями. Поскольку влажность воздуха в приборе изменяется в интервале $30 \dots 60\%$, на поверхности деталей за счет адсорбции образуется пленка влаги толщиной не более 10 молекулярных слоев. Такая пленка, что показано в гл. 2, не обладает свойствами воды как жидкости, и поэтому общая суммарная масса водяного пара, адсорбированного на всех поверхностях деталей, ввиду малой толщины пленки будет также небольшой.

Основное поглощение влаги деталями происходит путем абсорбции; поглощают влагу при этом только детали из органических материалов (пластмассы, компаунды, лаки, резины и т. п.); в основном — это электрическая изоляция.

Изменению относительной влажности с $\varphi_0=30\%$ до $\varphi_1=60\%$ соответствует изменение парциального давления водяных паров от p_0 до p_1 :

$$p_0 = \frac{10^3 \varphi_0 A (1 + \beta t)}{0,81} = \frac{10^3 \cdot 30 \cdot 18,7 \cdot 10^{-3} (1 + 20/273)}{0,81} = 745 \text{ Па};$$

$$p_1 = \frac{10^3 \varphi_1 A (1 + \beta t)}{0,81} = \frac{10^3 \cdot 60 \cdot 18,7 \cdot 10^{-3} (1 + 20/273)}{0,81} = 1490 \text{ Па};$$

$$A = 0,15 \left(\frac{t+30}{10} \right)^3 = 0,15 \left(\frac{20+30}{10} \right)^3 = 18,7 \text{ г/м}^3 = 18,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3,$$

где A — абсолютная влажность насыщения воздуха при $t=+20^\circ\text{C}$, вычисленная по формуле (1.9).

Масса органических материалов в приборе (масса электрической изоляции) составляет $20 \dots 30\%$ общей массы прибора; принимая эту величину равной 25% , получим

$$m_{\text{из}} = 0,25m = 0,25 \cdot 10 = 2,5 \text{ кг.}$$

Масса поглощенной влаги при $p_0=745$ Па и $p_1=1490$ Па составит:

$$m_0 = Vhp_0 = \frac{m_{из}}{\gamma_{из}} h_{из} p_0 = \frac{2,5}{1,3 \cdot 10^3} \times \\ \times 0,75 \cdot 10^{-3} \cdot 745 = 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 1,08 \text{ г},$$

$$m_1 = Vhp_1 = \frac{m_{из}}{\gamma_{из}} h_{из} p_1 = \frac{2,5}{1,3 \cdot 10^3} \times \\ \times 0,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1490 = 2,15 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 2,15 \text{ г},$$

где $h_{из}=0,75 \cdot 10^{-3} \text{ с}^2/\text{м}^2$ — принятое усредненное значение коэффициента растворимости влаги для изоляционных материалов;

$\gamma_{из}=1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ — принятое усредненное значение плотности изоляции.

Таким образом, 2,5 кг органических материалов прибора содержат около 1 г влаги при относительной влажности окружающего их воздуха $\phi_0=30\%$ и около 2 г при $\phi_1=60\%$, т. е. при изменении ϕ от 30 до 60% эти материалы поглощают около 1 г влаги.

Поглощение влаги влагопоглотителем. Для прибора объемом 10 дм³, по существующим рекомендациям, необходимо иметь 50 г влагопоглотителя (из расчета 5 г влагопоглотителя на каждый литр объема). Возьмем силикагель марки КСК, для которого $h_c=1,9 \cdot 10^{-2} \text{ с}^2/\text{м}^2$, $\rho_c=515 \text{ кг/м}^3$.

Независимо от вида размещения этого силикагеля (в патроне любой формы или мешочке) вследствие медленного натекания влаги внутрь прибора вся масса влагопоглотителя будет равномерно увлажняться по мере повышения влажности внутри прибора.

Вычислим массу поглощаемой силикагелем влаги, для чего вначале определим

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_c} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{515} = 97 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$V_B = V_c h_c = 97 \cdot 10^{-6} \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} = 184 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot \text{с}^2,$$

где V_c — объем силикагеля, м³; V_B — влажностная емкость, м·с²;
масса поглощенной влаги

при $\phi_0=30\%$, $p_0=745$ Па

$$m_0 = V_B p_0 = 184 \cdot 10^{-8} \cdot 745 = 1,373 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 1,37 \text{ г};$$

при $\phi_1=60\%$, $p_1=1490$ Па

$$m_1 = V_B p_1 = 184 \cdot 10^{-8} \cdot 1490 = 2,746 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 2,75 \text{ г}.$$

Таким образом, 50 г влагопоглотителя — силикагеля КСК содержат 1,4 г влаги при $\phi=30\%$ и около 2,8 г влаги при $\phi=60\%$, т. е.

при изменении φ с 30 до 60 % влагопоглотитель поглощает около 1,4 г влаги.

Поглощение влаги воздухом. При относительной влажности $\varphi_0 = 30\%$ и температуре $+20^\circ\text{C}$ абсолютная влажность

$$a_0 = A \frac{\varphi}{100} = 0,15 \left(\frac{t+30}{10} \right)^3 \frac{\varphi}{100} = 0,15 \times \\ \times \left(\frac{20+30}{10} \right)^3 \frac{30}{100} = 5,63 \text{ г/м}^3;$$

при относительной влажности $\varphi_1 = 60\%$

$$a_1 = 0,15 \left(\frac{20+30}{10} \right)^3 \frac{60}{100} = 11,3 \text{ г/м}^3.$$

Масса влаги, находящейся в 7 дм^3 воздуха внутри прибора, при $\varphi_0 = 30\%$ $m_{в0} = 5,63 \cdot 0,007 = 0,0394 \text{ г}$;

при $\varphi_1 = 60\%$ $m_{в1} = 11,3 \cdot 0,007 = 0,079 \text{ г}$.

Таким образом, масса влаги в воздухе прибора при изменении его относительной влажности от 30 до 60 % изменяется от 0,0394 до 0,0790 г.

Оценка поглощения влаги в приборе. Для рассматриваемого прибора значения поглощенной влаги указаны в табл. 5.1.

Т а б л и ц а 5.1

Сравнительная оценка поглощения влаги различными конструктивными элементами прибора

Относительная влажность воздуха внутри прибора φ , %	Масса влаги, г, поглощенной			
	детальями	силикагелем	воздухом	всего
30	1,08	1,37	0,0394	2,49
60	2,15	2,75	0,0790	4,98
Поглощенная влага, %	43,4 %	55 %	1,6 %	100 %

Таким образом, из табл. 5.1 следует, что воздух прибора поглощает менее 2 % всей входящей в прибор влаги, около 43 % поглощается детальями и 55 % поглощается влагопоглотителем (при принятой норме укладки влагопоглотителя в прибор).

Поэтому при анализе процессов статического и динамического

Физико-механические показатели силикагеля

Показатели	Гранулированный мелкопористый			Грану
	КСМГ		ШСМГ	КСКГ
	Высший сорт	1-й сорт		
Размер зерен, мм	2,8 ... 7,0	2,8 ... 7,0	1,0 ... 3,6	2,8 ... 7,0
Насыпная плотность, г/дм ³ , не менее	780	720	720	400...500
Влагоемкость, %, не менее, при относительной влажности, %				
20	9,5	9	9	
40	17	16	16	
60	27	25	25	
100	Не нормируется			70
Потери при высушивании, %, не более	8	10	10	5
Коэффициент растворимости влаги η , с ² /м ² :				
вычисленный по формуле 5.2	0,14 ... 0,16	0,12 ... 0,14	0,12 ... 0,14	
вычисленный по формуле 5.4	0,16	0,15	0,15	

Таблица 5.2

Дробный крупнопористый			Кусковой мелкопористый			
ШСКГ	МСКГ	АСКГ	КСМК	ШСМК	МСМК	АСМК
1,0...3,6	0,25...2,0	0,2...0,5	2,8...7,0	1,5...3,6	0,25...2,0	0,2...0,5
400...500	400...500	400...500	670	670	670	670
Не нормируется			10	10	9,5	9,5
			20	20	20	19
			29	29	29	28
			Не нормируется			
70	70	70	Не нормируется			
5	5	5	10	10	10	10
Не нормируется			0,14	0,14	0,14	0,14
			0,14	0,14	0,14	0,14

осушения воздуха в приборах и аппаратах можно не учитывать поглощение влаги воздухом и нужно обязательно учитывать поглощение влаги деталями прибора и влагопоглотителем, размещенным в приборе. При этом статические и динамические свойства такого поглотителя будут зависеть как от свойств материала (вещества) влагопоглотителя, так и от формы патрона, в котором он размещается внутри прибора.

5.5. ВЛАГОПОГЛОТИТЕЛИ

Наиболее широко применяющийся влагопоглотитель — силикагель, реже используют алюмогель, иногда применяют цеолиты.

Силикагель — это продукт обезвоживания геля кремниевой кислоты [19], имеющий состав $m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Высушенный силикагель имеет вид стекловидной массы с высокой пористостью. Поры в силикагеле сравнительно однородны и распределены по объему равномерно; мелкопористый силикагель имеет поры диаметром 2...3 нм, крупнопористый — диаметром 8...12 нм, удельная площадь поверхности пор 250...320 м²/г.

Силикагель применяется в виде зерен (кусков неправильной формы или округлых гранул) размером 0,2...7 мм.

Физико-механические показатели силикагеля по ГОСТ 3956—76 приведены в табл. 5.2.

Силикагель в рассматриваемых конструкциях должен поглощать влагу и поддерживать в окружающей его среде относительную влажность не выше 55%, поэтому в соответствии с положениями, изложенными в гл. 4, поглощение влаги силикагелем подчиняется закону Генри, т. е.

$$c = h p. \quad (5.1)$$

Коэффициент влагорастворимости или растворимости влаги h , указанный в выражении (5.1), и является параметром, однозначно определяющим статические свойства влагопоглотителя — силикагеля; динамические же свойства силикагеля определяются его коэффициентом диффузии влаги D .

К сожалению, значения h и D непосредственно в ГОСТ 3956—76 не указаны.

Значения h можно вычислить по другим показателям, указанным в табл. 5.2; значения D по показателям табл. 5.2 вычислить нельзя, и их приходится определять опытным путем. Поскольку расчет статических и динамических процессов влагообмена без параметров h и D невозможен, эти параметры приходится определять расчетным и опытным путями разработчику системы осушения.

Коэффициент растворимости h вычисляют по значению влагоемкости, указанному в табл. 5.2, исходя из следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{\Delta c}{p}, \quad \Delta c = \frac{\Delta G}{V}, \quad h = \frac{\Delta G}{G_0} \cdot \frac{G_0}{Vp}, \\ \frac{G_0}{V} &= \rho_c, \quad p = 23,4\varphi \quad (\text{при } t = +20^\circ \text{C}), \quad h = \\ &= \frac{100\Delta G}{G_0} \cdot \frac{\rho_c}{100 \cdot 23,4\varphi} = \frac{Z\rho_c}{2340\varphi}, \quad h = \frac{\beta\rho_c}{p}, \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

где $Z = 100\Delta G/G_0$ — влагоемкость, %, при относительной влажности φ , % (указана в табл. 5.2); $\beta = \Delta G/G_0$ — относительное увлажнение; ρ_c — насыпная плотность, кг/м^3 (указана в табл. 5.2).

По уравнению (5.2) вычислены значения h , которые приведены в табл. 5.2.

Для мелкопористых силикагелей (и только для мелкопористых) в интервале $\varphi = 20 \dots 60\%$ справедливо приближенное эмпирическое соотношение

$$Z \approx 0,5\varphi. \quad (5.3)$$

Учитывая выражения (5.2) и (5.3), получим

$$h = \frac{0,5\varphi\rho_c}{2340\varphi} = 2,1 \cdot 10^{-4}\rho_c, \quad (5.4)$$

где h — коэффициент растворимости влаги мелкопористого силикагеля, $\text{с}^2/\text{м}^2$; ρ_c — насыпная плотность силикагеля, кг/м^3 .

Коэффициент диффузии D характеризует динамические свойства влагопоглотителя и может быть получен только в результате анализа нестационарных процессов влагообмена; методика определения D изложена в ряде источников, например в работе [7].

5.6. ВЛАГОПОГЛОЩАЮЩИЕ ПАТРОНЫ

Эффективность применения влагопоглощающих патронов в конструкциях приборов, герметичных упаковках определяется их статическими и динамическими свойствами по поглощению влаги, а именно влагоемкостью, суммарным количеством поглощенной влаги m , расходом влаги q и зависимостью m и q от времени и состояния окружающей среды.

Влагопоглощающие патроны применяют десятки лет. Однако в нормативно-технических документах на них отсутствуют данные о величинах m и q , а в технической литературе только в последнее время появились работы [7, 8] по методике расчета m и q .

Рассмотрим конструкции патронов и методики их расчета.

Конструкция и параметры глухих влагопоглощающих патронов.
 Большинство конструкций глухих влагопоглощающих патронов и мешочков, наполненных влагопоглощающим материалом (наиболее часто — силикагелем), может быть сведено к конструктивным схемам, изображенным на рис. 5.2, а — д.

При использовании патронов поглощение влаги силикагелем из осушаемого объема производится через перфорированную стенку (сетку) площадью F_0 (фактически площадь контакта силикагеля с воздухом осушаемого объема составляет kF_0 , где $0,3 < k < 0,7$ в зависимости от перфорации стенки). При необходимости защиты осушаемого объема от проникновения в него пыли силикагеля из пат-

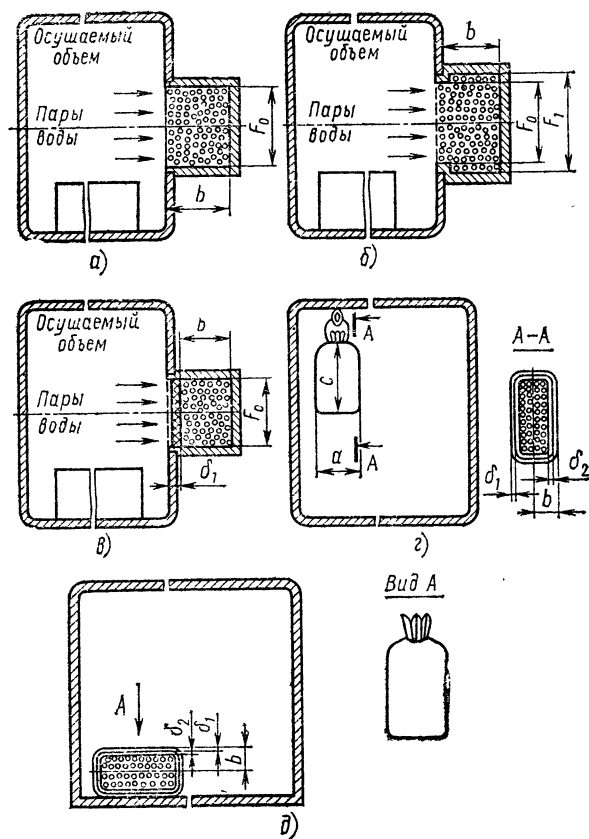


Рис. 5.2. Конструктивные схемы влагопоглощающих патронов и мешочков

рона параллельно перфорированной стенке устанавливается более мелкая сетка, а также влагопроницаемая бумага.

При использовании мешочков поглощение влаги силикагелем из осушаемого объема производится непосредственно через стенку мешочка (материал стенки — хлопчатобумажная бязь, марля); при этом в зависимости от схемы размещения мешочка в осушаемом объеме (мешочек положен на бок или подвешен) изменяются условия его влагообмена с окружающим воздухом. При необходимости защиты от пыли силикагеля стенка мешочка делается двойной (бязь и один слой влагопроницаемой бумаги) или тройной (бязь и два слоя влагопроницаемой бумаги).

И патроны, и мешочек имеют общий функциональный признак — поглощение влаги происходит на границе в зоне контакта и затем перемещение влаги внутрь происходит за счет диффузии. Это позволяет для патронов и мешочка принять расчетные схемы процессов влагообмена, аналогичные схемам влагообмена неограниченной плоской влагопоглощающей глухой стенки с влажным воздухом.

Процесс поглощения влаги патроном (и мешочком) можно представить состоящим из следующих процессов (при отсутствии принудительного перемешивания воздуха): диффузии влаги в воздухе через входные перфорационные отверстия; диффузии влаги в воздухе в глубину силикагеля по воздушным каналам между зернами силикагеля; диффузии влаги в каждое зерно силикагеля из окружающих зерно воздушных каналов.

В соответствии с этой физической картиной поглощения влаги патроном постоянная времени патрона имеет вид:

$$T_1 = F_0 b h_c \frac{b}{2D_c h_c F_0} = \frac{b^2}{2D_c}, \quad (5.5)$$

где T_1 — влажностная постоянная времени патрона, с (рис. 5.2, а);

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{1}{2D_c} \left(\frac{V_c}{F_0} \right)^2 = \frac{1}{2D_c} \left(\frac{V_c}{F_1} \right)^2 \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2 = \\ &= \frac{b^2}{2D_c} \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2, \end{aligned} \quad (5.6)$$

где T_2 — влажностная постоянная времени патрона, с (рис. 5.2, б).

Соотношения (5.5) и (5.6) справедливы для патронов, имеющих малое влажностное сопротивление входа $R_{вх}$ по сравнению с суммарным влажностным сопротивлением слоя силикагеля (силикагель патрона отделен от осушаемого объема только тонкой перфорированной стенкой или сеткой).

Если же это $R_{вх}$ увеличено, например за счет установки бумажной стенки — фильтра пыли между перфорированной стенкой и силикагелем, то для таких патронов необходимо учитывать и $R_{вх}$. Для этих патронов (рис. 5.2, в) получим

$$T_3 = \frac{b^2}{2D_c} \left(1 + \frac{2\delta_1 P_c}{bP_1} \right), \quad (5.7)$$

где P_1 — коэффициент проницаемости бумаги водяными парами, с; P_c — коэффициент влагопроницаемости силикагеля, с; δ_1 — толщина бумаги, м.

Определим T для мешочка с силикагелем. Оболочка мешочка обычно делается двухслойной: снаружи влагопроницаемая хлопчатобумажная ткань толщиной δ_1 , под ней влагопроницаемая бумага толщиной δ_2 , которая препятствует выходу пыли силикагеля из мешочка.

Для случая крепления такого мешочка в осушаемом объеме путем подвески, когда воздух свободно контактирует со всех сторон (рис. 5.2, г), получим

$$T_4 = \frac{b^2}{2D_c} \left[1 + \frac{\delta_1/P_1 + \delta_2/P_2}{b/(2P_c)} \right], \quad (5.8)$$

где P_1, P_2 — соответственно коэффициенты проницаемости водяных паров через ткань и бумагу, с.

Если оболочка мешочка выполнена однослойной (без бумаги) из неплотной ткани (бязи, марли), то $\delta_2 = 0$, $\delta_1/P_1 \ll b/(2P_c)$ и из выражения (5.8) получим

$$T_4 = b^2/(2D_c). \quad (5.9)$$

Для случая крепления многослойного мешочка в осушаемом объеме путем укладки широкой стороной на горизонтальное основание (рис. 5.2, д)

$$T_5 = \frac{4b^2}{2D_c} \left[1 + \frac{\delta_1/P_1 + \delta_2/P_2}{b/P_c} \right]; \quad (5.10)$$

для мешочка с однослойной оболочкой из неплотной ткани в этом случае получим

$$T_5 = 4b^2/(2D_c). \quad (5.11)$$

Указанные влажностные постоянные времени T_1 — T_5 патрона и мешочка, зависящие от их конструктивной формы, являются одним из их динамических параметров; другой динамический параметр — приход влаги q , поглощаемой патроном.

Если на входе патрона парциальное давление водяных паров p_v поддерживать постоянным, то за счет разности давлений Δp между

p_v и начальным давлением паров воды в патроне $p_{н.с}$ патрон начинает поглощать влагу; при этом приход влаги q будет

$$q = \frac{\Delta p}{R_c} e^{-\tau/T} = \frac{2D_c h_c F_0}{b} (p_v - p_{н.с}) e^{-\tau/T}, \quad (5.12)$$

где q — массовый приход влаги, поглощаемой патроном, кг/с; p_v — парциальное давление паров воды в воздухе на входе в патрон, Па; $p_{н.с}$ — начальное (остаточное) парциальное давление паров воды внутри патрона, Па,

$$p_{н.с} = \beta_{н.с} p_c / h_c, \quad (5.13)$$

где $\beta_{н.с}$ — начальное (остаточное после сушки) относительное увлажнение силикагеля.

В начальный момент времени при $\tau=0$ из выражения (5.12) получим максимальный приход влаги q_m :

$$q_m = \frac{2D_c h_c F_0}{b} (p_v - p_{н.с}). \quad (5.14)$$

Следует подчеркнуть, что выражение (5.12) определяет q только при постоянном давлении паров влаги на входе в патрон; поскольку же патрон поглощает влагу, то это означает, что к входу патрона непрерывно поступает свежий воздух с давлением паров p_v . Из выражения (5.12) видно, что в этом случае приход влаги в патрон непрерывно падает по экспоненте и к моменту времени $3T$ поглощение влаги практически заканчивается, при этом парциальное давление паров влаги в силикагеле по всей глубине патрона достигает значения p_v .

К моменту насыщения патрон поглотит количество влаги

$$m = \int_0^{\infty} q d\tau = F_0 b h_c (p_v - p_{н.с}) = V_v (p_v - p_{н.с}). \quad (5.15)$$

Рассмотренный режим работы патрона при постоянном давлении p_v на его входе характеризует динамические возможности патрона и реально может применяться только при испытании патрона для экспериментального определения параметров T , q_m и m .

Именно эти же параметры патрона необходимы для рассмотрения процесса взаимодействия патрона с осушаемым им объемом при переменном во времени давлении $p_v(\tau)$.

Указанные выше соотношения были получены и проверены в серии опытов с патронами и мешочками, заполненными силикагелем КСК.

Обработка результатов этих опытов приводит к следующим выводам:

подтверждается справедливость соотношений (5.5) — (5.11) для расчета T (с погрешностью не более $\pm 30\%$);

перфорированная стенка на входе патрона с диаметром отверстий более 1 мм и коэффициентом перфорации более 0,3, а также шелковая сетка с размером окон в свету крупнее 0,15×0,15 мм и шагом сетки более 0,3×0,3 мм практически не увеличивают входное влажностное сопротивление;

бумага-фильтр на входе увеличивает влажностное входное сопротивление; каждый слой влагопроницаемой бумаги толщиной 0,15 мм увеличивает входное влажностное сопротивление патрона примерно на 25%.

Пример расчета параметров глухого патрона. Вычислим параметры V_b и T для патрона вида, приведенного на рис. 5.2, а, при $b=30$ мм, $d=20$ мм, заполненного силикагелем КСК с начальной (оценочной) обводненностью $\beta_n=2\%$; вход патрона — перфорированная стенка.

Вычислим также q и m при непрерывном контакте патрона с воздухом, имеющим относительную влажность 60% при температуре +20 °С.

Для силикагеля КСК

$$D_c = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}, \quad h_c = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ с}^2/\text{м}^2, \quad \rho_c = 515 \text{ кг/м}^3.$$

1. Вычислим влажностную емкость патрона:

$$V_b = F_0 b h_c = \frac{\pi}{4} (20 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} = 18 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot \text{с}^2.$$

2. Вычислим влажностную постоянную времени патрона:

$$T = T_1 = \frac{b^2}{2D_c} = \frac{(30 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9}} = 4,1 \cdot 10^5 \text{ с} = 114 \text{ ч}.$$

3. Вычислим парциальное давление водяных паров воздуха при $\varphi=60\%$, $t=+20$ °С:

$$p_a = \frac{10^3 \varphi_b A (1 + \beta t)}{0,81} = \frac{10^3 \cdot 60 \cdot 17,6 \cdot 10^{-3} (1 + 20/273)}{0,81} = 1400 \text{ Па},$$

$A = 17,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ — абсолютная влажность насыщения воздуха при $t=+20$ °С (см. табл. 1.3); $\beta = 1/273 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ — температурный коэффициент расширения воздуха.

4. Вычислим парциальное давление водяных паров $p_{н.с.}$, эквивалентное начальной обводненности силикагеля:

$$p_{н.с.} = \frac{\beta_n \rho_c}{h_c} = \frac{0,02 \cdot 515}{1,9 \cdot 10^{-2}} = 540 \text{ Па},$$

$\beta_n = 0,02$ — начальная обводненность силикагеля.

5. Вычислим относительную влажность воздуха $\varphi_{н.с}$, соответствующую парциальному давлению паров $p_{н.с}$ при $t = +20^\circ\text{C}$:

$$\varphi_{н.с} = \frac{0,81 p_{н.с}}{10^3 A (1 + \beta t)} = \frac{0,81 \cdot 540}{10^3 \cdot 17,6 \cdot 10^{-3} (1 + 20/273)} = 23\%.$$

Это означает, что патрон с силикагелем, имеющим начальную (остаточную) обводненность 2%, по степени увлажнения находится в состоянии, равновесном с воздухом при относительной влажности 23% и температуре $+20^\circ\text{C}$; такой патрон может поглощать влагу только из воздуха с относительной влажностью более 23% (при $t = +20^\circ\text{C}$).

6. Вычислим приток влаги в патрон при его непрерывном контакте с воздухом с относительной влажностью 60%:

$$\begin{aligned} q &= \frac{2D_c F_0 h_c}{b} (p_v - p_{н.с}) e^{-\tau/T} = \\ &= \frac{2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 1,9 \cdot 10^{-2}}{30 \cdot 10^{-3}} (1400 - 540) e^{-\frac{\tau}{4,1 \cdot 10^5}} = \\ &= 3,76 \cdot 10^{-10} e^{-\frac{\tau}{4,1 \cdot 10^5}} \text{ кг/с.} \end{aligned}$$

Приток влаги, начиная от максимума, по мере увлажнения патрона, непрерывно падает по экспоненте; максимальный приток влаги в патрон в момент $\tau = 0$ составляет $q_m = 3,76 \cdot 10^{-10}$ кг/с.

7. Вычислим общее количество влаги m , поглощаемое патроном из воздуха с относительной влажностью 60%:

$$m = V_v (p_v - p_{н.с}) = 18 \cdot 10^{-8} (1400 - 540) = 155 \cdot 10^{-6} \text{ кг} = 0,155 \text{ г.}$$

Эту влагу патрон поглотит из воздуха за время, равное примерно 3Т; к этому моменту времени приток влаги уменьшится практически до нуля. В этом режиме время полного увлажнения патрона составит 3Т, т. е. 340 ч.

8. Вычислим массу сухого силикагеля, насыпаемого в патрон:

$$m_c = V \rho_c = 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 515 = 4,85 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 4,85 \text{ г.}$$

Конструкция и параметры проточного влагопоглощающего патрона. Проточный влагопоглощающий патрон (рис. 5.3) заполнен зернами влагопоглощающего материала, чаще всего зернами силикагеля. Входная и выходная стороны оболочки патрона выполнены перфорированными или сетчатыми, обеспечивающими проход воздуха из окружающей среды в патрон и обратно; рабочее сечение F_0 по всей длине L постоянно.

Если между входом и выходом патрона есть разность давлений,

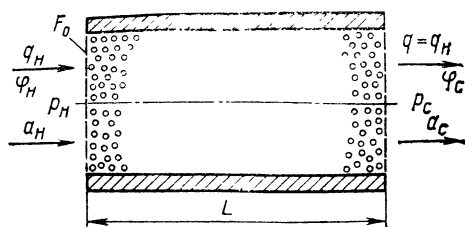


Рис. 5.3. Конструктивная схема проточного влагопоглощающего патрона

го через патрон будет перетекать воздух с объемным расходом q_H ; при этом воздух будет обтекать зерна силикагеля и, если влажность силикагеля ниже влажности воздуха, воздух будет осушаться.

Геометрические размеры патрона выбирают такими, чтобы при расходе воздуха q_H последний успевал отдать свою влагу зернам влагопоглотителя и выходящий из патрона воздух имел влажность, равновесную с влажностью предварительно осушенного (регенерированного) влагопоглотителя. Распределение давлений водяных паров в зернах патрона по всей длине в некоторый момент времени t для случая $p_H = \text{const}$, $q_H = \text{const}$, $t = \text{const}$ показано на рис. 5.4.

К моменту времени t зерна на участке АВ уже «отработали» свой ресурс, т. е. их влажность стала равновесной с влажностью p_H входящего в патрон воздуха. На участке ВС длиной L_0 зерна «работают», т. е. поглощают влагу из проходящего между ними воздуха; в точке С осушаемый воздух по влажности становится равновесным с влажностью сухого поглотителя p_C , и дальнейшего осушения воздуха при его движении на участке CD не происходит. С течением времени фронт поглощения влаги (кривая ВС) движется с некоторой скоростью V_{BC} от входа к выходу патрона. При достижении точкой С точки D патрон «отрабатывает» свой ресурс полностью и при дальнейшем продувании воздуха через такой патрон его влажность на выходе будет выше p_C .

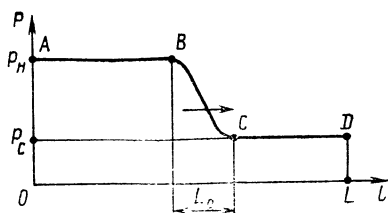
Статические и динамические параметры проточного патрона характеризуют следующие величины:

- m — общее количество влаги, поглощенное патроном;
- p_C , a_C , φ_C — соответственно парциальное давление водяных паров в зернах высушенного влагопоглотителя, абсолютная и относительная влажности равновесного с ним воздуха;
- V_{CB} — объем высушенного воздуха, прошедшего через патрон за время его активной работы;
- τ_p — время активной работы патрона при расходе воздуха через патрон q_H ;
- L_0 — длина «активного» работающего слоя.

Эти параметры для линейного участка закона Генри (см. 4.1) можно вычислить, исходя из следующих соображений.

1. Из патрона в течение τ_p будет выходить осушенный воздух с объемным расходом q_H и абсолютной влажностью a_C , равновесной с

Рис. 5.4. Распределение влажности зерен влагопоглотителя в проточном патроне



влажностью поглотителя, имеющего остаточное (после регенерации) или начальное относительное увлажнение β_n ; из выражения (5.2) получим:

$$p_c = \frac{\beta_n p_c}{h_c}, \quad a_c = \frac{0,81 p_c}{10^5 (1 + \beta t)}, \quad \varphi_c = \frac{0,81 p_c}{10^3 A (1 + \beta t)}.$$

2. Величины m , $V_{св}$, τ_p и L_0 определяются следующими соотношениями [9]:

$$m = F_0 L h_c (p_n - p_c); \quad (5.16)$$

$$V_{св} = \frac{m}{a_n - a_c}; \quad (5.17)$$

$$\tau_p = \frac{V_{св}}{q_n}; \quad (5.18)$$

$$L_0 = \frac{0,097 d^2 q_n}{10^5 D_c F_0 h_c (1 + \beta t)}; \quad (5.19)$$

$$q_{nm} = \frac{10^5 L D_c F_0 h_c (1 + \beta t)}{0,097 d^2}, \quad (5.20)$$

где d — диаметр зерна влагопоглотителя, м; t — температура воздуха, °C; $\beta = 1/273$ °C⁻¹.

Пример расчета параметров проточного патрона. Проточный патрон — цилиндр диаметром $D_{вн} = 0,206$ м и длиной $L = 0,3$ м, заполненный зернами силикагеля КСК диаметром $d = 4$ мм. Патрон продувается воздухом $\varphi = 87\%$, $t = +20$ °C, $q_n = 0,68$ дм³/с; начальное относительное увлажнение силикагеля $\beta_n = 0,02$.

Определим влажность и количество выходящего осушенного воздуха, продолжительность работы патрона, длину работающего слоя, максимально возможный расход воздуха через патрон.

1. Из патрона будет выходить осушенный воздух с объемным расходом q_n и влажностью p_c , φ_c , a_c , равновесной с влажностью силикагеля, имеющего β_n , т. е.

$$p_c = \frac{\beta_n p_c}{h_c} = \frac{0,02 \cdot 515}{1,9 \cdot 10^{-2}} = 542 \approx 540 \text{ Па};$$

$$\varphi_c = \frac{0,81 p_c}{10^3 A (1 + \beta t)} = \frac{0,81 \cdot 540}{10^3 \cdot 17,6 \cdot 10^{-3} (1 + 20/273)} = 23\%;$$

$$a_0 = \frac{0,81 p_c}{10^5 (1 + \beta t)} = \frac{0,81 \cdot 540}{10^5 (1 + 20/273)} = 4,07 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3,$$

где $h_c = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ с}^2/\text{м}^2$; $\rho_c = 515 \text{ кг/м}^3$ — для силикагеля КСК.

2. Патрон поглотит общее количество влаги m (5.16):

$$p_n = \frac{10^3 \varphi_n A (1 + \beta t)}{0,81} = \frac{10^3 \cdot 87 \cdot 17,6 \cdot 10^{-3} (1 + 20/273)}{0,81} = 2030 \text{ Па};$$

$$m = F_0 L h_c (p_n - p_c) = 0,0333 \cdot 0,3 \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} (2030 - 540) = 0,283 \text{ кг};$$

$$F_0 = \frac{\pi D_{вн}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,206^2}{4} = 0,0333 \text{ м}^2.$$

3. Патроном будет осушен объем воздуха V_c :

$$a_n = A \frac{\varphi_n}{100} = \frac{17,6 \cdot 10^{-3} \cdot 87}{100} = 15,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3;$$

$$V_c = \frac{m}{a_n - a_c} = \frac{0,283}{(15,3 - 4,07) 10^{-3}} = 25,2 \text{ м}^3.$$

4. Продолжительность работы патрона при расходе q_n :

$$\tau_p = \frac{V_c}{q_n} = \frac{25,2}{0,68 \cdot 10^{-3}} = 37 \cdot 10^3 \text{ с} = 10,3 \text{ ч}.$$

5. Длина работающего слоя L_0 :

$$L_0 = \frac{0,0967 \cdot q_n \cdot d^2}{10^5 D_c F_0 h_c (1 + \beta t)} =$$

$$= \frac{0,0967 \cdot 0,68 \cdot 10^{-3} (4 \cdot 10^{-3})^2}{10^5 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot 0,0333 \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} (1 + 20/273)} = 14,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 14 \text{ мм}.$$

6. Максимально возможный расход воздуха через патрон

$$q_{\text{им}} = \frac{10^5 L D_c F_0 h_c (1 + \beta t)}{0,0967 d^2} =$$

$$= \frac{10^5 \cdot 0,3 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot 0,0333 \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} (1 + 20/273)}{0,0967 (4 \cdot 10^{-3})^2} = 0,0145 \text{ м}^3/\text{с}.$$

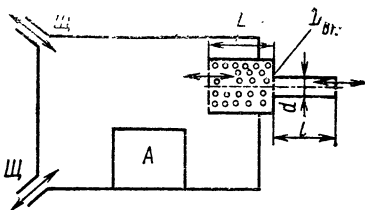
7. Постоянная времени увлажнения зерна

$$T = \frac{d^2}{8 \pi D_c} = \frac{(4 \cdot 10^{-3})^2}{8 \pi \cdot 1,1 \cdot 10^{-9}} = 580 \text{ с}.$$

Проточный бездиффузионный влагопоглощающий патрон. Для герметизирующих оболочек, имеющих сравнительно невысокую степень герметичности, надежным средством поддержания внутри оболочки оптимальной относительной влажности является применение

Рис. 5.5. Конструктивная схема проточного бездиффузионного патрона

проточного бездиффузионного влагопоглощающего патрона, устанавливаемого в оболочку по схеме, приведенной на рис. 5.5.



Такой патрон имеет ту же конструктивную схему, что и патрон, показанный на рис. 5.3, только его входное отверстие выполнено в форме удлиненной трубки длиной l и внутренним диаметром d .

Размеры L , $D_{вн}$ и диаметр зерен силикагеля в патроне выбирают такими, чтобы его гидравлическое сопротивление R_p при прохождении по нему воздуха было гораздо меньше гидравлического сопротивления $R_{щ}$ щелей $Щ$ в оболочке, желательно выполнить условие

$$R_p \leq (0,01 \dots 0,1) R_{щ}. \quad (5.21)$$

Гидравлическое сопротивление R_T удлиненной трубки также должно быть гораздо меньше $R_{щ}$, желательно выполнить условие

$$R_T \leq (0,01 \dots 0,1) R_{щ}. \quad (5.22)$$

При выполнении условий (5.21) и (5.22) перетекание воздуха внутрь оболочки и из нее под действием изменения температуры и атмосферного давления окружающей среды будет происходить в основном через патрон, а через щели в оболочке оно будет относительно малым.

Такая конструкция патрона с $R_p \ll R_{щ}$ обеспечит эффективное осушение воздуха внутри оболочки не только при отсутствии в ней щелей, но и при образовании в оболочке небольших отверстий (щелей) в процессе хранения (прорыв оболочки гвоздем при упаковке, трещина в местах перегиба, перетирание гибкой оболочки о жесткие элементы конструкции и т. п.).

Однако работа такого патрона будет длительной только в том случае, если на его входную сторону не будет поступать влажный воздух из окружающей среды за счет диффузии водяных паров; эта диффузия существенно ослабляется посредством полой трубки, устанавливаемой на входном торце патрона.

Для ослабления диффузионного перетекания влаги внутрь патрона длина трубки l должна быть выбрана такой, чтобы постоянная времени диффузионного переноса влаги по трубке

$$T = l^2 / (2D) \quad (5.23)$$

была не менее $3 \dots 4$ ч, т. е. не менее $(10 \dots 15) 10^3$ с.

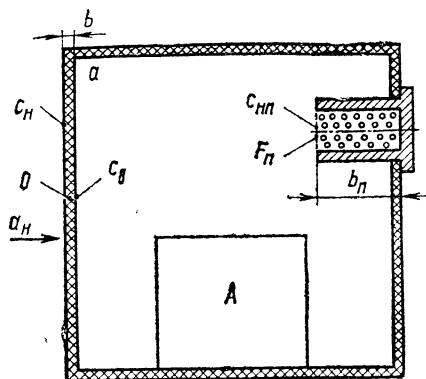


Рис. 5.6. Конструктивная схема упаковки

5.7. СИСТЕМЫ СТАТИЧЕСКОГО ОСУШЕНИЯ

Системы статического осушения воздуха как технические средства для регулирования влажности рассмотрены ниже только для герметизирующих оболочек, в которых определяющим является диффузионное перетекание влаги через стенку оболочки и поглощение этой влаги влагопоглощающими патронами.

Рассмотрим схему упаковки (рис. 5.6). Упаковка имеет герметичную оболочку O площадью F и толщиной b . Внутри упаковки помещаются аппарат A и влагопоглощающий патрон с силикагелем, который открытой частью, площадью $F_{п}$, контактирует с воздухом внутри упаковки (вместо патрона могут быть мешочки с силикагелем, помещенные внутри упаковки).

Расчет сводится к отысканию связи между влажностью воздуха $a(t)$ внутри упаковки в зависимости от влажности воздуха a_n снаружи, геометрии упаковки (F , b), свойств материала оболочки (D , h), геометрии патрона ($F_{п}$, $b_{п}$) и влагопоглощающих свойств силикагеля в нем ($D_{п}$, $h_{п}$).

При решении этой задачи будем считать, что накопление влаги внутри упаковки происходит только в патроне (накопления влаги в материале оболочки, в аппарате и в воздухе внутри оболочки малы по сравнению с накоплением влаги в патроне); решение задачи для случая накопления влаги в патроне и в аппарате рассмотрено в гл. 4. Решение рассматриваемой задачи в общем виде изложено в работе [8].

Для оценки возможностей этого метода осушения воздуха и разработки практических рекомендаций по его реализации рассмотрим наиболее «нагруженный» частный случай, когда снаружи непрерывно действует воздух с повышенной влажностью $a_{н0} = \text{const}$, при этом $a_{н0} > a_d$, где a_d — допустимая для данной аппаратуры влажность окружающего воздуха, соответствующая, например, относительной влажности $\varphi_d = 55\%$.

Полагая начальные условия нулевыми, получим при $a_n(0) = a_{n0}$

$$a(\tau) = a_{n0} - a_{n0} \frac{R}{R+R_n} e^{-\frac{\tau}{(1+R/R_n)T_n}}, \quad (5.24)$$

где

$R = \frac{b}{DhF}$ — влажностное сопротивление оболочки, $m^{-1} \cdot c^{-1}$;

$R_n = \frac{b_n}{2D_n h_n F_n}$ — влажностное сопротивление патрона, $m^{-1} \cdot c^{-1}$;

$T_n = \frac{b_n^2}{2D_n}$ — постоянная времени увлажнения патрона, с.

Герметизированная упаковка выполняет свое назначение эффективно, если

$$R > 10R_n. \quad (5.25)$$

Условие (5.25) физически означает, что на пути движения влаги из наружного воздуха в патрон герметизирующая оболочка оказывает сопротивление гораздо большее, чем влагопоглощающий патрон.

Учитывая условие (5.25), получим

$$\frac{R}{R+R_n} \approx 1; 1 + \frac{R}{R_n} \approx \frac{R}{R_n}. \quad (5.26)$$

Учитывая условия (5.25) и (5.26), получим из выражения (5.24)

$$a(\tau) = a_{n0} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_n R/R_n}} \right). \quad (5.27)$$

Уравнение (5.27) описывает процесс нарастания влажности воздуха внутри упаковки; упростим его, имея в виду, что

$$T_n/R_n = V_n h_n, \quad (5.28)$$

где $V_n h_n$ — влагоемкость патрона, $m \cdot c^2$; $V_n = F_n b_n$ — объем влагопоглотителя в патроне силикагеля, m^3 .

С учетом (5.28) из уравнения (5.27) получим:

$$a(\tau) = a_{n0} \left(1 - e^{-\tau/T_y} \right); \quad (5.29)$$

$$T_y = RV_n h_n / 86400, \quad (5.30)$$

где τ — текущее время, сут; T_y — постоянная времени увлажнения упаковки, сут.

Уравнение (5.29) получено для нулевых начальных условий, т. е. при условии, что влагопоглотитель в патроне не имел начальной обводненности (нулевое количество влаги в патроне). Однако практически влагопоглотитель имеет некоторую начальную обводненность β_n , следовательно, внутри патрона при этом будет парциальное давление водяных паров

$$p_{n-p} = \beta_n p_n / h_p, \quad (5.31)$$

где β_n — относительная начальная обводненность влагопоглотителя; обычно $\beta_n = 0,02$; p_n — насыпная плотность влагопоглотителя, кг/м^3 .

Этому давлению водяных паров p_{n-p} будет соответствовать начальная влажность воздуха a_0 внутри упаковки:

$$a_0 = \frac{0,81 p_{n-p}}{10^5 (1 + \beta t)}. \quad (5.32)$$

Анализ показывает, что в этом случае при $a_{n0} = \text{const}$ процесс увлажнения воздуха внутри упаковки будет описываться уравнением

$$a(\tau) = a_0 + (a_{n0} - a_0) (1 - e^{-\tau/T_y}). \quad (5.33)$$

На графике зависимости (5.33) показано (рис. 5.7) допустимое время хранения $\tau_{x.d.}$ в течение которого влажность воздуха внутри не превысит допустимой влажности a_d . Это допустимое время хранения определяется уравнением

$$\tau_{x.d.} = T_y \ln \frac{a_{n0} - a_0}{a_{n0} - a_d} = T_y \ln \frac{\varphi_{n0} - \varphi_0}{\varphi_{n0} - \varphi_d}, \quad (5.34)$$

где φ_{n0} , φ_0 , φ_d — соответственно действующая снаружи, начальная и допустимая относительные влажности воздуха, %.

Из уравнений (5.33) и (5.34) следует, что определяющим параметром процесса набора влаги упаковкой является постоянная времени увлажнения упаковки T_y ; выбирая и конструктивно обеспечивая этот параметр, можно обеспечить оптимальную относительную влажность воздуха внутри упаковки в течение заданного срока хранения.

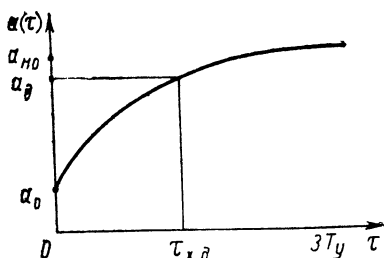
Пример расчета упаковки. Рассчитаем упаковку для следующих условий:

аппаратура помещена внутри мягкой герметизирующей упаковки, имеющей габаритные размеры $1000 \times 1000 \times 800$ мм; снаружи мягкая упаковка защищена деревянными щитами;

материал упаковки — пленка полиэтиленовая, толщина $b = 0,25$ мм;

срок хранения — три месяца (июнь — август) в районе г. Таллина, под навесом (защищено от воздействия прямых солнечных лучей и ветра);

Рис. 5.7. Изменения влажности воздуха внутри упаковки



допустимая относительная влажность воздуха Φ_d внутри упаковки к концу срока хранения — не более 50%;

влагопоглотитель внутри упаковки — силикагель КСК с начальной обводненностью $\beta = 0,02$ в мешочках (см. рис. 5.2, д); размер мешочка $a \times c \times 2b = 80 \times 160 \times 50$ мм, для КСК — $\rho_c = 515$ кг/м³, $h_c = 1,9 \cdot 10^{-2}$ с²/м², $D_c = 1,1 \cdot 10^{-9}$ м²/с.

1. Определяем условия хранения. Для района г. Таллинна для июня — августа в соответствии с табл. 1.2 получим: средняя суточная температура $t_{cp} = 15,1$ °С, средняя абсолютная влажность насыщения воздуха $A_{cp} = 13,7 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, средняя относительная влажность воздуха $\Phi_{cp} = 77,9\%$, средняя абсолютная влажность воздуха $a_{cp} = A_{cp} \Phi_{cp} / 100 = 10,9 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.

Итак, $a_{cp} = a_{н0} = 10,9 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.

2. Определяем a_d и a_c .

Допустимая абсолютная влажность воздуха внутри упаковки

$$a_d = A_{cp} \frac{\Phi_d}{100} = 13,7 \cdot 10^{-3} \frac{50}{100} = 6,85 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

Влажность воздуха a_0 , равновесную с влажностью силикагеля КСК при его начальной обводненности, вычислим по выражениям (5.31) и (5.32):

$$p_{н.п} = \frac{\beta_n \rho_c}{h_c} = \frac{0,02 \cdot 515}{1,9 \cdot 10^{-2}} = 542 \text{ Па};$$

$$a_0 = \frac{0,81 p_{н.п}}{10^5 (1 + \beta t)} = \frac{0,81 \cdot 542}{10^5 (1 + 15,1/273)} = 4,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

3. Определяем T_y по уравнению (5.34), считая $\tau_{х.д} = 3$ мес = 90 сут:

$$T_y = \frac{\tau_{х.д}}{\ln \frac{a_{н0} - a_0}{a_{н0} - a_d}} = \frac{90}{\ln \frac{10,9 - 4,16}{10,9 - 6,85}} = 177 \text{ сут.}$$

4. Определяем влажностное сопротивление оболочки:

$$R = \frac{b}{DhF} = \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-12} \cdot 4,4 \cdot 10^{-4} \cdot 5,2} = 9,1 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1},$$

где для полиэтиленовой пленки $D=1,2 \cdot 10^{-12}$ м²/с; $h=4,4 \cdot 10^{-4}$ с²/м²,
 $F=4 \cdot 0,8 \cdot 1 + 2 \cdot 1 \cdot 1 = 5,2$ м² — площадь оболочки.

5. Определяем объем влагопоглотителя по соотношению (5.30):

$$V_n = \frac{86400 T_y}{R h_c} = \frac{86400 \cdot 177}{9,1 \cdot 10^{10} \cdot 1,9 \cdot 10^{-2}} = 8,84 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

6. Определяем число мешочков n .

Объем одного мешочка

$$V = a \times c \times 2b = 80 \cdot 160 \cdot 50 = 640 \cdot 10^3 \text{ мм}^3 = 640 \text{ см}^3,$$

число мешочков

$$n = V_n / V = 8840 / 640 = 13,8 \approx 14.$$

Итак, необходимо 14 мешочков с силикагелем КСК.

7. Проверяем условие (5.25).

Влажностное сопротивление одного мешочка, размещенного в упаковке, выполненной по схеме рис. 5.2, д,

$$R_{n1} = \frac{2b}{2D_c h_c F} =$$

$$= \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} \cdot 128 \cdot 10^{-4}} = 9,35 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1},$$

где $F = a \times c = 8 \cdot 16 = 128 \text{ см}^2 = 128 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ — площадь влагопоглощения одного мешочка.

Влажностное сопротивление 14 мешочков (параллельное соединение R)

$$R_n = \frac{R_{n1}}{n} = \frac{9,35 \cdot 10^{10}}{14} = 0,668 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Поскольку $R_n = 0,668 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, а $R = 9,1 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, то условие (5.25) выполняется; следовательно, упаковка выбрана правильно.

5.8. ДИНАМИЧЕСКОЕ ОСУШЕНИЕ, АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ

Динамическое осушение воздуха внутри герметизированного объема посредством принудительной подачи в этот объем предварительно осушенного воздуха может быть непрерывным или периодическим. Этот способ осушения воздуха внутри герметизированного объема в принципе пригоден для объемов любой степени герметичности, в том числе очень малой. На основе этого способа можно создавать сравнительно простые и экономичные системы автоматического регулирования влажности воздуха внутри герметизированного объема.

Теория этого процесса изложена в 4.8; используя ее, рассмотрим вопросы, связанные с практической реализацией и особенностями продувок, а также вопросы реализации систем автоматического регулирования влажности.

Непрерывная продувка. Она заключается в том, что в герметизированный объем, имеющий внутри начальную влажность воздуха a_0 , с момента времени $\tau=0$ непрерывно вдувается сухой воздух с расходом q_n и абсолютной влажностью a_n , при этом $a_n < a_0$. В общем случае величины q_n и a_n могут быть переменными во времени, однако для практической реализации проще использовать системы с $q_n = \text{const}$ и $a_n = \text{const}$, при этом величины q_n и a_n должны удовлетворять следующим условиям:

$$q_n \geq q_n; \quad (5.35)$$

$$a_1 < a_n < a_2, \quad (5.36)$$

где q_n — расход воздуха, натекающего в герметизированный объем через его щели под действием внешних климатических факторов (температуры, давления, обдува ветром) при выключенной системе продувки, $\text{м}^3/\text{с}$; a_1, a_2 — заданные нижнее и верхнее допустимые значения абсолютной влажности воздуха внутри герметизированного объема, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Сухой, или правильнее, осушенный воздух для продувки наиболее экономично получать непосредственно в процессе продувки путем осушки атмосферного воздуха.

Установка для непрерывной продувки (рис. 5.8) состоит из двух поочередно работающих линий I и II приготовления осушенного воздуха и системы трубопроводов, связывающих эту линию с герметизированным объемом и атмосферой.

Каждая линия осушки воздуха состоит из нагнетающего центробежного вентилятора 1 (11), фильтра 2 (12) очистки атмосферного воздуха, нагревателя 3 (13), адсорбера 4 (14), фильтра 5 (15) очистки осушенного воздуха, клапанов 8 (18), пропускающих осушенный воздух через трубопровод 9 в герметизированный объем 10; через клапаны 6 (16) при регенерации адсорбента регенерирующий воздух сбрасывается в атмосферу.

Каждая линия приготовления осушенного воздуха работает поочередно в режимах «Осушка воздуха» и «Регенерация сорбента»; управление режимами осуществляется таймером 19. В линии I в режиме «Осушка воздуха» влажный атмосферный воздух с влажностью a_n забирается из атмосферы вентилятором 1, очищается от пыли в фильтре 2, проходит через выключенный нагреватель 3 и адсорбер 4, где осушается до влажности a_n , очищается в фильтре 5 от пыли адсорбента и через задвижку 7 и открытый клапан 8 (при этом клапаны 6 и 18 закрыты) нагнетается в объем 10. Воздух выходит из объема

10 через щели в герметизирующей оболочке; расход воздуха q_n первоначально устанавливается задвижкой 7.

Осушка воздуха в адсорбере до влажности a_n обеспечивается тем, что адсорбер выполнен в виде проточного патрона (см. 5.6), его адсорбент ранее в режиме «Регенерация сорбента» был регенерирован до влажности β_0 , равновесной с a_n , а диаметр, длина патрона и марка сорбента выбраны такими, что в течение цикла осушения воздуха «отрабатывает» не более 80% длины адсорбента, начиная слева. На выходе адсорбера даже в конце цикла осушения всегда будет адсорбент с влажностью β_0 и выходящий из него воздух будет иметь влажность a_n .

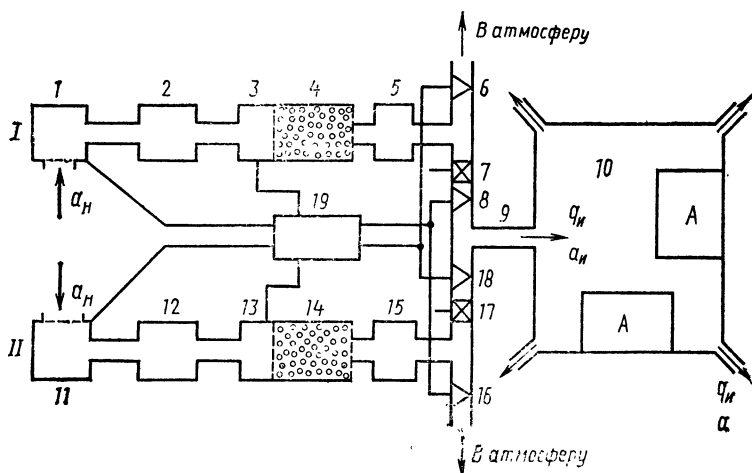


Рис. 5.8. Схема установки для непрерывной продувки

В линии II в это время происходит регенерация адсорбента в адсорбере 14 за счет прогрева его адсорбента воздухом, нагретым в нагревателе 13; нагретый воздух отбирает влагу у адсорбента и через клапан 16 сбрасывается в атмосферу. Температура прогрева адсорбента поддерживается на определенном, заранее известном уровне так, что после регенерации получается адсорбент с заранее заданной остаточной влажностью β_0 (подробнее см. ниже), что, в свою очередь, и обеспечивает потом осушку воздуха до заданной влажности a_n .

Длительность цикла $T_{\text{ц}}$ следует выбирать минимально возможной, так как уменьшение $T_{\text{ц}}$ ведет к уменьшению размеров адсорберов 4 и 14, а следовательно, и к уменьшению других элементов установки. Однако уменьшение $T_{\text{ц}}$ ограничивается тем, что за время $T_{\text{ц}}/2$ должны быть проведены регенерация адсорбента и его естественное

охлаждение после регенерации. Выполненный анализ различных вариантов показывает, что приемлемым для практики значением является $T_{\text{ц}} = 24$ ч; при этом за 12 ч нормально проводятся регенерация адсорбента (6 ч) и его естественное охлаждение (6 ч).

Изменение влажности воздуха внутри объема 10 в процессе непрерывной продувки описывается уравнением (4.85) и изображено на рис. 4.26. Ниже рассмотрена процедура решения уравнения (4.85) для конкретных условий продувки; там же приведены некоторые соображения и рекомендации о выборе параметров продувки.

При непрерывной продувке влажность воздуха a постепенно и непрерывно уменьшается от начального значения $a(0)$, чуть меньшего a_0 , до a_n и затем будет непрерывно поддерживаться на уровне a_n до конца продувки.

Время τ_y достижения установившегося состояния вычисляется по зависимости

$$\tau_y = 3T(k_1 + 1),$$

где

$$T = \frac{b^2}{2D} ; k_1 = \frac{2DFh_m}{q_n b h_b} ;$$

b , F — эквивалентные толщина и площадь стенок элементов аппаратуры, отдающих влагу; D , h_m — коэффициенты диффузии и растворимости влаги материала стенок.

Уменьшение времени τ_y возможно только за счет уменьшения k_1 , т. е. за счет соответствующего увеличения q_n ; однако уменьшать k_1 до значения, существенно меньшего единицы, нецелесообразно, так как при этом τ_y практически не уменьшается, а расход осушенного воздуха q_n возрастает.

Непрерывная продувка объема осушенным воздухом имеет существенное достоинство — она обеспечивает постоянство влажности воздуха в объеме, равное a_n в течение любого времени $\tau > \tau_y$; поэтому такая продувка рекомендуется для тех случаев, когда требуется очень стабильное значение влажности воздуха внутри объема в течение любого заданного промежутка времени.

Недостаток этого способа — наличие двух линий осушения воздуха, что усложняет конструкцию.

Пример расчета установки непрерывной продувки.

Исходные данные. Герметизированный кузов внутренним объемом 20 м³ имеет аппаратуру общей массой $m = 5000$ кг. Занимаемый элементами аппаратуры объем $V_э = 1,5$ м³, объем воздуха $V_0 = 18,5$ м³. Масса влагопоглощающих материалов элементов $m_b = 1250$ кг (25% от m), их коэффициент диффузии влаги $D = 3 \cdot 10^{-12}$ м²/с, коэффициент растворимости влаги $h_m = 0,75 \cdot 10^{-3}$ с²/м², плотность $\gamma_b =$

$= 1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, средняя толщина глухой стенки элементов $b = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Герметичность кузова такова, что под действием ветра при включенной системе продувки в кузов через его щели натекает наружный воздух с $q_n = 0,156 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; воздух снаружи имеет влажность $\varphi_n = 87\%$ при $t = +20^\circ \text{C}$.

Непрерывной продувкой необходимо поддерживать внутри кузова влажность $\varphi_n = (30 \pm 5)\%$.

Длительность цикла $T_{\text{ц}}$ для данной установки принимается равной 48 ч; при этом в каждой линии в течение $0,5 T_{\text{ц}} = 24 \text{ ч}$ производится осушение воздуха и его подача в герметизированный кузов, а в течение следующих 24 ч осуществляется регенерация сорбента в адсорбере (12 ч — нагрев воздуха, его пропуск через сорбент и сброс в атмосферу, 12 ч — естественное охлаждение адсорбера без пропуска воздуха через него). Заметим здесь, что длительность цикла $T_{\text{ц}} = 48 \text{ ч}$ принята с большим запасом, как указано выше, минимальная длительность цикла может быть около 24 ч.

Расчет. При температуре $+20^\circ \text{C}$ относительным влажностям φ_n и φ_i соответствуют следующие абсолютные влажности a_n и a_i и парциальные давления водяных паров p_n и p_i :

$$\varphi_n = 87\%, a_n = 15,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3, p_n = 2029 \text{ Па},$$

$$\varphi_i = 30\%, a_i = 5,28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3, p_i = 700 \text{ Па}.$$

Общая площадь элементов, поглощающих влагу,

$$F = \frac{m_b}{b \gamma_b} = \frac{1250}{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,3 \cdot 10^3} = 640 \text{ м}^2.$$

Объемный расход влаги из поверхностного слоя, приведенный к влажности воздуха,

$$q_m = \frac{2DFh_m}{bh_b} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^{-12} \cdot 640 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 74 \cdot 10^{-7}} = 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Выбираем значение расхода q_i продувки: q_i обязательно должен быть больше q_n , что обеспечит невозможность натекания влажного атмосферного воздуха через щели внутрь кузова; q_i желательно иметь больше q_m , что обеспечит быстрое снижение влажности в кузове при продувке, так как влага из элементов выделяется с расходом q_m и уносится из объема с расходом q_i . Принимаем $q_i = 0,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (выбранное значение q_i обеспечивается регулировкой задвижки).

Вычислим $a(\tau)$ по уравнению (4.85); для данного случая имеем:

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= \frac{q_m}{q_i} = \frac{0,26 \cdot 10^{-3}}{0,52 \cdot 10^{-3}} = 0,5; N = \\ &= \frac{V_0}{q_i} = \frac{18,5}{0,52 \cdot 10^{-3}} = 3,56 \cdot 10^4 \text{ с}, \end{aligned}$$

$$T = \frac{b^2}{2D} = \frac{(1,5 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-12}} = 37,5 \cdot 10^4 \text{ с},$$

$$a_0 = a_n = 15,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3, \quad \frac{T}{N} = \frac{37,5 \cdot 10^4}{3,56 \cdot 10^4} = 10,5,$$

$$\frac{a_n}{a_0} = \frac{5,28 \cdot 10^{-3}}{15,3 \cdot 10^{-3}} = 0,345.$$

Вычислим корни s_1 и s_2 из уравнения $W(s) = 0$:

$$NTs^2 + [T(\kappa_1 + 1) + N]s + 1 = 0;$$

$$3,56 \cdot 10^4 \cdot 37,5 \cdot 10^4 \cdot s^2 + [37,5 \cdot 10^4 (0,5 + 1) + 3,56 \cdot 10^4]s + 1 = 0;$$

$$133 \cdot 10^8 s^2 + 59,8 \cdot 10^4 s + 1 = 0; \quad s_1 = -1,74 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1};$$

$$s_2 = -43,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}.$$

Вычислим $U(s_1)$ и $U(s_2)$:

$$U(s) = Na_0 \left\{ Ts^2 + \left[\frac{T}{N} \left(\frac{a_n}{a_0} + \kappa_1 \right) + 1 \right] s + a_n \right\};$$

$$U(s_1) = U(-1,74 \cdot 10^{-6}) = 3,56 \cdot 10^4 \cdot 15,3 \cdot 10^{-3} \{ 37,5 \cdot 10^4 \times$$

$$\times (-1,74 \cdot 10^{-6})^2 + [10,5(0,345 + 0,5) + 1] (-1,74 \cdot 10^{-6}) \} +$$

$$+ 5,28 \cdot 10^{-3} = -3,49 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3;$$

$$U(s_2) = U(-43,1 \cdot 10^{-6}) = 3,56 \cdot 10^4 \cdot 15,3 \cdot 10^{-3} \times$$

$$\times \{ 37,5 \cdot 10^4 (-43,1 \cdot 10^{-6})^2 + [10,5(0,345 + 0,5) +$$

$$+ 1] (-43,1 \cdot 10^{-6}) \} + 5,28 \cdot 10^{-3} = 152 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

Вычислим $sW'(s)$: $W'(s) = 2NTs + T(\kappa_1 + 1) + N$;

$$s_1 W'(s_1) = -1,74 \cdot 10^{-6} [2 \cdot 3,56 \cdot 10^4 \cdot 37,5 \cdot 10^4 (-1,74 \cdot 10^{-6}) +$$

$$+ 37,5 \cdot 10^4 (0,5 + 1) + 3,56 \cdot 10^4] = -0,96;$$

$$s_2 W'(s_2) = -43,1 \cdot 10^{-6} [2 \cdot 3,56 \cdot 10^4 \times$$

$$\times 37,5 \cdot 10^4 (-43,1 \cdot 10^{-6}) + 37,5 \cdot 10^4 (0,5 + 1) + 3,56 \cdot 10^4] = 23,8.$$

Вычислим $U(s)/[sW'(s)]$:

$$\frac{U(s_1)}{s_1 W'(s_1)} = \frac{-3,49 \cdot 10^{-3}}{-0,96} = 3,64 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3;$$

$$\frac{U(s_2)}{s_2 W'(s_2)} = \frac{152 \cdot 10^{-3}}{23,8} = 6,39 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

Вычислим $U(0)/W(0)$:

$$U(0)/W(0) = a_n/1 = 5,28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

Определим $a(\tau)$ по уравнению (4.85):

$$a(\tau) = 5,28 \cdot 10^{-3} + 3,64 \cdot 10^{-3} e^{-1,74 \cdot 10^{-6} \tau} +$$

$$+ 6,39 \cdot 10^{-3} e^{-43,1 \cdot 10^{-6} \tau}$$

или

$$a(\tau) = 5,28 \cdot 10^{-3} + 3,64 \cdot 10^{-3} e^{-\frac{\tau}{57,5 \cdot 10^4}} + \\ + 6,39 \cdot 10^{-3} e^{-\frac{\tau}{2,32 \cdot 10^4}}. \quad (5.37)$$

Из графика $a(\tau)$, построенного по уравнению (5.37), следует (рис. 5.9), что $a(\tau)$ представляет собой сумму двух спадающих экспонент; поскольку величины T и N отличаются друг от друга примерно на порядок, то и каждая из экспонент, в основном, зависит только либо от T , либо от N .

Так, экспонента $3,64 \cdot 10^{-3} \exp[-\tau/(57,5 \cdot 10^4)]$ зависит в основном от T и физически означает процесс осушения влагопоглощающего материала элементов; экспонента $6,39 \cdot 10^{-3} \exp[-\tau/(2,32 \cdot 10^4)]$ зависит в основном от N и физически означает процесс смешивания осушенного воздуха с ранее находившимся в кузове влажным воздухом.

Анализ показывает, что при продувке кузова для случая $T \gg N$ и $k_1 < 1$ можно вместо зависимости (4.85) использовать приближенную формулу

$$a(\tau) \approx a_n + \frac{k_1}{k_1 + 1} (a_0 - a_n) e^{-\frac{\tau}{T(k_1 + 1)}} + \\ + \frac{1}{k_1 + 1} (a_0 - a_n) e^{-\frac{\tau}{N/(k_1 + 1)}}. \quad (5.38)$$

Применение формулы (5.38) вместо зависимости (4.85) позволяет быстро рассмотреть и сравнить между собой варианты продувок при различных принятых q_n .

Расчет адсорбера. Адсорбер, в котором производится осушение атмосферного воздуха влажностью a_n до влажности a_0 , представляет собой цилиндр с внутренним диаметром $D_{вн}$ и длиной L , заполненный силикагелем марки КСК. Поскольку осушение воздуха осуществляется путем его продувки вдоль цилиндра, то такой адсорбер по принципу работы эквивалентен прямоточному патрону, основные параметры которого рассмотрены в 5.6.

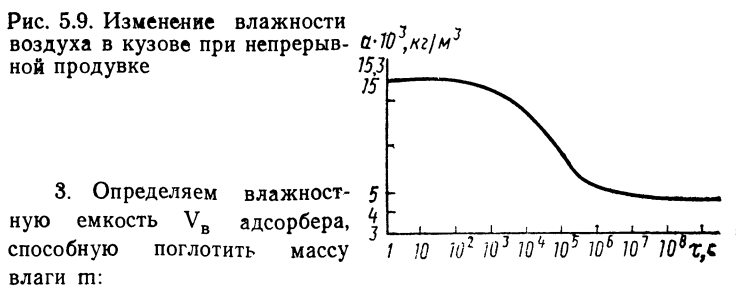
1. Определяем объем $V_{с.в}$ воздуха, осушаемого в одном адсорбере за время продувки $T_{ц}$:

$$V_{с.в} = q_n T_{ц} = 0,52 \cdot 10^{-3} \cdot 24 \cdot 3600 = 44,9 \text{ м}^3.$$

2. Определяем массу влаги, поглощаемой адсорбером:

$$m = V_{с.в} (a_n - a_0) = 44,9 (15,3 - 5,28) 10^{-3} = 0,45 \text{ кг}.$$

Рис. 5.9. Изменение влажности воздуха в кузове при непрерывной продувке



3. Определяем влажностную емкость $V_{\text{в}}$ адсорбера, способную поглотить массу влаги m :

$$V_{\text{в}} = \frac{m}{P_{\text{н}} - P_{\text{и}}} = \frac{0,45}{2029 - 700} = 0,339 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^2.$$

4. Увеличиваем влажностную емкость на 20% для того, чтобы к концу цикла $T_{\text{ц}}$ в этом адсорбере на его выходе гарантированно оставался влагопоглотитель с начальной обводненностью β_0 :

$$V_{\text{в.к}} = 1,2V_{\text{в}} = 1,2 \cdot 0,339 \cdot 10^{-3} = 0,406 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^2.$$

5. Определяем внутренний объем адсорбера, заполненный силикагелем:

$$F_0 L = \frac{V_{\text{в.к}}}{h_{\text{с}}} = \frac{0,406 \cdot 10^{-3}}{1,9 \cdot 10^{-2}} = 0,0214 \text{ м}^3.$$

6. Определяем внутренние геометрические размеры адсорбера. Принимаем для данной конструкции $D_{\text{вн}}/L = 1/3$, получаем

$$\frac{\pi D_{\text{вн}}^2}{4} 3D_{\text{вн}} = 0,0214, \quad D_{\text{вн}} = 0,209 \text{ м}.$$

Принимаем $D_{\text{вн}} = 0,21 \text{ м}$, $L = 3D_{\text{вн}} = 3 \cdot 0,21 = 0,63 \text{ м}$.

Внутренний объем адсорбера, заполненный силикагелем,

$$V = \frac{\pi D_{\text{вн}}^2}{4} L = \frac{\pi \cdot 0,21^2}{4} \cdot 0,63 = 0,0218 \text{ м}^3.$$

Это значение соответствует значению в п. 5.

7. Определяем массу силикагеля КСК в адсорбере:

$$m_{\text{с}} = \rho_{\text{с}} V = 515 \cdot 0,0218 = 11,2 \text{ кг}.$$

8. Определяем остаточную обводненность β_0 , до которой должен осушаться силикагель в процессе регенерации:

$$\beta_0 = \frac{h_{\text{с}} P_{\text{и}}}{\rho_{\text{с}}} = \frac{1,9 \cdot 10^{-2} \cdot 700}{515} = 0,0258.$$

Эта обводненность β_0 равновесна влажности воздуха $P_{\text{и}} = 700 \text{ Па}$ ($a_{\text{и}} = 5,28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, $\varphi_{\text{и}} = 30\%$).

9. Определяем температуру $t_{\text{р}}$ нагрева воздуха в нагревателе

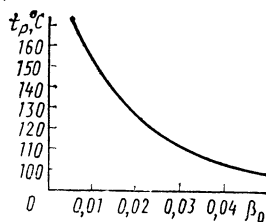


Рис. 5.10. Примерный вид графика $t_p = f(\beta_0)$ для силикагеля КСК

3 (13) при регенерации силикагеля. Эта температура определяется по графику $t_p = f(\beta_0)$, экспериментально полученному для каждой марки силикагеля и принятым размерам цилиндра адсорбера (рис. 5.10).

10. Определяем расход q_p воздуха при регенерации. Обычно q_p принимают в 2—3 раза больше $q_{и}$; необходимое значение q_p обеспечивается соответствующей установкой задвижки сброса воздуха в атмосферу (на рис. 5.8 не показана).

Принимаем $q_p = 2,5$ $q_{и} = 2,5 \cdot 0,52 \cdot 10^{-3} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Периодическая продувка. Периодическая продувка заключается в том, что в герметизированный объем периодически вдувается осушенный воздух и в это время влажность воздуха и аппаратуры снижается, а в паузах между продувками в этот объем через щели натекает наружный влажный воздух и влажность воздуха и аппаратуры повышаются.

Наибольший практический интерес представляют варианты продувок, которые могут быть полностью автоматическими; к ним относятся периодическая продувка по жесткой программе и периодическая продувка — система автоматического регулирования влажности воздуха в герметизированном объеме.

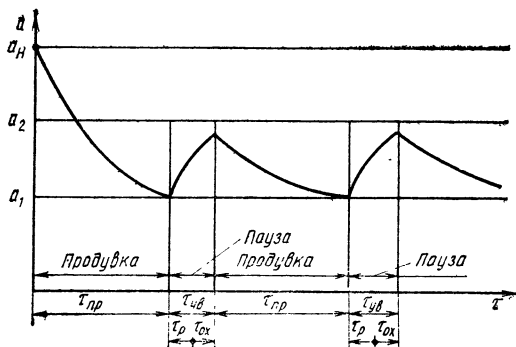


Рис. 5.11. Изменение влажности воздуха внутри кузова при продувке по жесткой программе

Периодическая продувка по жесткой программе. Изменение влажности воздуха внутри герметизированного объема при продувке по жесткой программе изображено на рис. 5.11, а на рис. 5.12 приве-

дена схема установки, обеспечивающей такую продувку (А. с. 1115028 СССР, МКИ G 05D22/02).

Установка содержит нагнетатель воздуха 1, фильтр атмосферного воздуха 2, нагреватель воздуха 3 с размещенными внутри него электронагревателем 4 и датчиком температуры нагрева воздуха 5, адсорбер 6, заполненный сорбентом 7, фильтр осушенного воздуха 8, клапаны 9 и 10 с приводами, задвижки 11 и 12, задатчик температуры нагрева регенерирующего воздуха 13, блок сравнения и релейного усиления 14, циклический таймер 15.

Задвижка 11 связана трубопроводом с атмосферой, задвижка 12 — с герметизированным объемом 16. Внутри объема 16 размещена аппаратура 17; в стенках объема имеются щели 18, связывающие внутреннюю полость объема 16 с атмосферой.

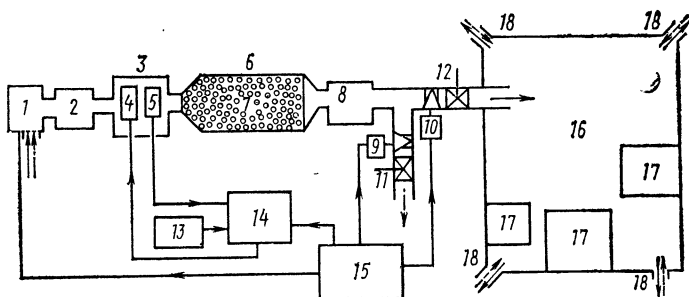


Рис. 5.12. Схема установки для периодической продувки по жесткой программе (→ — продувка; — — — → — натекание атмосферного воздуха; — . — . → — регенерация)

Установка работает следующим образом. Циклический таймер 15 работает непрерывно, выдавая последовательно чередующиеся команды заданной длительности на режимы «Продувка» и «Пауза».

В режиме «Продувка» таймером 15 включен нагнетатель воздуха 1, выключен блок 14 и через него выключен электронагреватель 4, закрыт клапан 9, открыт клапан 10.

Влажный воздух влажностью a_n забирается из атмосферы, прогоняется через адсорбер 6, где он контактирует с ранее регенерированным до влажности β_0 сорбентом 7, осушается до влажности a_1 , равновесной с β_0 , и подается внутрь объема 16 на продувку. Общий расход продуваемого воздуха устанавливается задвижкой 12.

Абсолютная влажность воздуха a внутри объема 16 в режиме «Продувка» постепенно понижается, достигает установившегося значения a_1 и затем остается на этом уровне до конца продувки.

Размеры адсорбера 6, массу и марку сорбента 7 назначают такими, чтобы при принятых расходе и длительности продувки в адсорбе-

ре 6 к концу продувки увлажнялась большая часть сорбента по длине, начиная слева, а правые слои сорбента имели влажность β_0 и выходящий из адсорбера осушенный воздух имел влажность a_1 во все время продувки.

По окончании режима «Продувка» таймер 15 переводит всю установку в режим «Пауза», при котором в объеме 16 происходит поглощение натекающей из атмосферы влаги, а адсорбер 6 переводится в режим регенерации сорбента 7; при этом нагнетатель 1 включен, блок 14 включен, клапан 9 открыт, клапан 10 закрыт. Воздух забирается из атмосферы, прогоняется через нагреватель воздуха 3, где нагревается электронагревателем 4 до температуры t_p , измеряемой датчиком 5, проходит через ранее увлажненный сорбент 7, регенерирует его до остаточной влажности β_0 и через клапан 9 сбрасывается в атмосферу; расход регенерирующего воздуха устанавливается задвижкой 11.

Регенерация сорбента 7 до остаточной влажности β_0 обеспечивается заданием в задатчике температуры нагрева воздуха 13 соответствующей температуры нагрева воздуха t_p на заданном уровне t_3 посредством релейного регулятора температуры нагрева регенерирующего воздуха, состоящего из датчика 5 и задатчика 13, блока сравнения и релейного усиления 14 и электронагревателя 4. Этот релейный регулятор отключает электронагреватель 4 при $t_p > t_3$ и включает его при $t_p \leq t_3$.

Продолжительность регенерации сорбента 7 выбирается с запасом такой, чтобы за это время в адсорбере 6 была проведена регенерация сорбента по всей его длине.

По окончании регенерации таймером 15 выключается нагнетатель 1, затем отключается блок 14 и через него выключается электронагреватель 4, клапан 9 остается открытым, клапан 10 — закрытым, адсорбер 6 переходит в режим естественного охлаждения, а в объеме 16 продолжается поглощение влаги, натекающей из атмосферы.

Продолжительность режима «Пауза» назначают такой, чтобы за это время были полностью проведены регенерация сорбента и естественное охлаждение адсорбера после регенерации.

Влажность воздуха a внутри объема 16 в режиме «Пауза» постепенно повышается, но к концу этого режима не достигает значения a_2 , что обеспечивается соответствующим выбором степени герметичности объема 16, определяющей значение расхода влажного воздуха, натекающего в объем 16, и длительности режима «Пауза».

По окончании режима «Пауза» заканчивается цикл работы, таймер 15 переводит устройство в режим «Продувка», начинается следующий цикл, аналогичный описанному выше. При многократном повторении циклов в каждом из них внутри объема 16 будет обеспечена влажность воздуха a в интервале значений $a_1 \leq a \leq a_2$. При

этом влажность аппаратуры 17 и стенок объема 16 независимо от исходного увлажнения до работы автоматического регулятора влажности будет постепенно приближаться к влажности, равновесной с влажностью воздуха а.

Расчет процессов снижения влажности внутри объема 16 при его продувке осушенным воздухом и повышения влажности при натекании в объем влажного воздуха проводится в соответствии с теорией, изложенной в гл. 4.

Выше был дан пример расчета процесса продувки осушенным воздухом; приведем пример расчета повышения влажности при натекании в объем наружного влажного воздуха.

Пример расчета увлажнения воздуха внутри кузова при натекании в него влажного воздуха снаружи. Исходные данные: кузов с аппаратурой, рассмотренный выше в 5.8.

Повышение влажности воздуха внутри кузова при натекании в него влажного воздуха снаружи через щели описывается уравнением (4.85).

Для данного случая имеем:

$a_0 = 5,28 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ — влажность воздуха внутри кузова в начале увлажнения, равная влажности воздуха a_1 в конце продувки;

$a_n = a_n = 15,3 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ — влажность натекающего атмосферного воздуха;

$q_n = q_n = 0,156 \cdot 10^{-3}$ м³/с — расход атмосферного воздуха, натекающего через щели (натекание под действием ветра, обдувающего кузов снаружи);

$q_m = 0,26 \cdot 10^{-3}$ м³/с — расход влаги в поверхностный слой аппаратуры.

Вычислим $a(\tau)$ по уравнению (4.85); для данного случая имеем

$$k_1 = \frac{q_m}{q_n} = \frac{0,26 \cdot 10^{-3}}{0,156 \cdot 10^{-3}} = 1,67; \quad \frac{a_n}{a_0} = \frac{15,3 \cdot 10^{-3}}{5,28 \cdot 10^{-3}} = 2,89;$$

$$N = \frac{V_0}{q_n} = \frac{18,5}{0,156 \cdot 10^{-3}} = 11,9 \cdot 10^4 \text{ с};$$

$$T = \frac{b^2}{2D} = \frac{(1,5 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-12}} = 37,5 \cdot 10^4 \text{ с};$$

$$\frac{T}{N} = \frac{37,5 \cdot 10^4}{11,9 \cdot 10^4} = 3,16.$$

Вычислим корни s_1 и s_2 из $W(s) = 0$:

$$W(s) = NTs^2 + [T(k_1 + 1) + N]s + 1 = 0; \quad 11,9 \cdot 10^4 \cdot 37,5 \cdot 10^4 s^2 + + [37,5 \cdot 10^4 (1,67 + 1) + 11,9 \cdot 10^4]s + 1 = 0; 444,7 \cdot 10^8 s^2 + 112 \times \times 10^4 s + 1 = 0; s_1 = -0,922 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}; \quad s_2 = -0,243 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}.$$

Вычислим $U(s)$:

$$U(s) = Na_0 \{ Ts^2 + \left[\frac{T}{N} \left(\frac{a_n}{a_0} + \kappa_1 \right) + 1 \right] s \} + a_n;$$

$$U(s_1) = U(-0,922 \cdot 10^{-6}) = 11,9 \cdot 10^4 \cdot 5,28 \cdot 10^{-3} \times \{ 37,5 \times 10^4 (-0,922 \cdot 10^{-6})^2 + [3,16(2,89 + 1,67) + 1] (-0,922 \cdot 10^{-6}) \} + 15,3 \cdot 10^{-3} = 6,6 \cdot 10^{-3};$$

$$U(s_2) = U(-0,243 \cdot 10^{-4}) = 11,9 \cdot 10^4 \cdot 5,28 \cdot 10^{-3} \cdot \{ 37,5 \times 10^4 (-0,243 \cdot 10^{-4})^2 + [3,16(2,89 + 1,67) + 1] (-0,243 \cdot 10^{-4}) \} + 15,3 \cdot 10^{-3} = -80,5 \cdot 10^{-3}.$$

Вычислим $sW'(s)$: $W'(s) = 2NTs + T(\kappa_1 + 1) + N$;

$$s_1 W'(s_1) = -0,922 \cdot 10^{-6} [2 \cdot 11,9 \cdot 10^4 \cdot 37,5 \cdot 10^4 \cdot (-0,922 \times 10^{-6}) + 37,5 \cdot 10^4 (1,67 + 1) + 11,9 \cdot 10^4] = -0,957;$$

$$s_2 W'(s_2) = -0,243 \cdot 10^{-4} [2 \cdot 11,9 \cdot 10^4 \cdot 37,5 \cdot 10^4 (-0,243 \cdot 10^{-4}) + 37,5 \cdot 10^4 (1,67 + 1) + 11,9 \cdot 10^4] = 25,3.$$

По уравнению (4.85) получим

$$a(\tau) = a_n + \frac{U(s_1)}{s_1 W'(s_1)} e^{s_1 \tau} + \frac{U(s_2)}{s_2 W'(s_2)} e^{s_2 \tau};$$

$$a(\tau) = 15,3 \cdot 10^{-3} + \frac{6,6 \cdot 10^{-3}}{-0,957} e^{-0,922 \cdot 10^{-6} \tau} + \frac{-80,5 \cdot 10^{-3}}{25,3} e^{-0,243 \cdot 10^{-4} \tau},$$

или

$$a(\tau) = 5,22 \cdot 10^{-3} + 6,9 \cdot 10^{-3} (1 - e^{-\frac{\tau}{1,08 \cdot 10^6}}) + 3,18 \cdot 10^{-3} (1 - e^{-\frac{\tau}{4,12 \cdot 10^4}}). \quad (5.39)$$

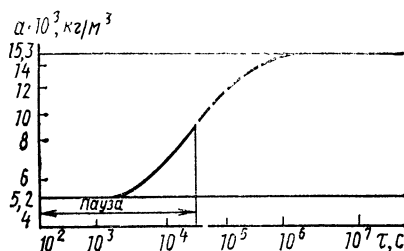
График $a(\tau)$, построенный по уравнению (5.39), представляет собой (рис. 5.13) сумму двух экспонент, возрастающих от начального значения $5,22 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ (теоретически начальное значение должно быть $5,28 \cdot 10^{-3}$ кг/м³; значение $5,22 \cdot 10^{-3}$ отличается от значения $5,28 \cdot 10^{-3}$ на погрешность расчета). Экспонента, имеющая постоянную времени $1,08 \cdot 10^6$ с, равную примерно значению $T(\kappa_1 + 1) = 37,5 \cdot 10^4 (1,67 + 1) \approx 1 \cdot 10^6$ с, характеризует в основном процесс поглощения влаги аппаратурой. Экспонента, имеющая постоянную времени $4,12 \cdot 10^4$ с, близкую к постоянной времени $N = 11,9 \cdot 10^4$ с, характеризует в основном процесс смешивания натекающего влажного воздуха с начальным объемом воздуха в кузове.

За первые 12 ч натекания воздуха влажность воздуха повысится с $a = 5,22 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ ($\varphi = 30\%$) до $a = 7,56 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ ($\varphi = 43\%$); полное же выравнивание между $a(\tau)$ и a_n при отсутствии продувок произойдет за время, большее $3 \cdot 1,08 \cdot 10^6$ с, т. е. примерно за 40 сут.

Возможности периодической продувки с жесткой программой.

Возможности установок, работающих по методу периодической продувки с жесткой программой, определяются особенностями двух процессов: собственно процесса продувки объема осушенным воздухом, когда влажность воздуха $a(\tau)$ внутри объема снижается, и процессом натекания влажного наружного воздуха, когда $a(\tau)$ внутри объема повышается.

Рис. 5.13. Изменение влажности воздуха в кузове при натекании атмосферного воздуха



С целью упрощения конструкции такой установки надо иметь в ней один адсорбер с тем, чтобы регенерацию увлажненного адсорбента в нем успевать проводить в режиме «Пауза», когда продувки нет. Минимальное время регенерации можно принять равным 12 ч (6 ч — продувка адсорбера горячим воздухом, 6 ч — естественное охлаждение); следовательно, минимальная продолжительность режима «Пауза» составляет 12 ч.

За эти 12 ч влажность воздуха $a(\tau)$ внутри объема непрерывно повышается; за предельно допустимый уровень повышения $a(\tau)$ может быть принято значение $9,68 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, что соответствует $\phi = 55\%$ при $t = +20^\circ\text{C}$. Уменьшить интенсивность повышения $a(\tau)$ можно, увеличивая N , т. е. уменьшая q_n за счет повышения уровня герметичности кузова, характеризуемого постоянной натекания N_n .

Анализ показывает, что периодическую продувку можно проводить в кузовах с постоянной натекания $N_n \geq 0,1$ с; в этом случае длительность «Паузы» можно принимать равной 12 ч.

Основное преимущество установок периодической продувки, работающих по жесткой программе, заключается в том, что, хотя и в кузове, и в его щелях не осуществляются измерение и контроль влажности воздуха, тем не менее внутри кузова непрерывно и автоматически поддерживается влажность воздуха $a(\tau)$ в наперед заданном интервале $a_1 \leq a < a_2$. Это обеспечивается тем, что продуваемый воздух осушается в адсорбере всегда до заданной влажности a_1 , поэтому техническая реализация установки периодической продувки по жесткой программе не вызывает каких-либо серьезных трудностей.

Система автоматического регулирования влажности воздуха. Система автоматического регулирования влажности воздуха в замкну-

том объеме (например, в кузове) в общем случае может стабилизировать влажность в заданных пределах и изменять ее по заданной программе.

В кузовах, имеющих внутри радиоэлектронную и другую аппаратуру, в целях обеспечения ее надежности и высокой готовности к работе (при периодических включениях) необходимо непрерывно поддерживать относительную влажность воздуха на уровне $\varphi_{\text{опт}} = 30 \dots 55\%$. Поскольку относительная влажность φ_n атмосферного воздуха, натекающего через щели в кузов, выше $\varphi_{\text{опт}}$, то для таких кузовов необходима система автоматического регулирования влажности, которая поддерживала бы влажность внутри кузова на более низком уровне, чем снаружи. Такая система регулирования влажности должна функционировать в течение всего времени, пока основная радиоэлектронная аппаратура, размещенная в кузове, находится в выключенном состоянии. При включении же в работу основной аппаратуры за счет выделения теплоты происходит самоподсушка воздуха внутри кузова (температура воздуха повышается на $8 \dots 10^\circ\text{C}$); в этот период система автоматического регулирования влажности воздуха не нужна и она должна быть отключена.

Рассмотрим структурную схему установки, обеспечивающей автоматическое поддержание относительной влажности воздуха внутри в заданном интервале $\varphi_1 \leq \varphi < \varphi_2$ (например, $\varphi_1 = 30\%$, $\varphi_2 = 55\%$).

Установка содержит (рис. 5.14) элементы 1—14, аналогичные элементам установки, показанной на рис. 5.12, а также блок управления 15, датчик влажности воздуха 18 и датчик температуры воздуха 19, установленные внутри кузова 17 с аппаратурой А, усилитель-преобразователь 23, релейный блок 16, задатчик допустимой относительной влажности воздуха 20, блок 21 суммирования общего времени продувки после регенерации и задатчик 22 суммарного времени продувок.

Установка работает следующим образом.

Блок управления 15 работает непрерывно, он выдает команду на продувку объема 17 осушенным в адсорбере 6 воздухом в момент достижения влажности воздуха в кузове верхнего допустимого значения φ_2 ; при этом производится продувка кузова осушенным в адсорбере воздухом.

По мере продувки кузова влажность смешиваемого в кузове воздуха постепенно падает, а датчики 18 и 19 непрерывно при этом измеряют его абсолютную влажность a и температуру t и передают их значения на вход усилителя-преобразователя 23.

В усилителе-преобразователе 23 производится вычисление по формуле (1.10) относительной влажности воздуха φ внутри кузова по данным a и t .

Вычисленное значение φ из блока 23 поступает на вход релейного блока 16, где оно непрерывно сравнивается со значениями из заданного интервала $\varphi_1 \leq \varphi_{зад} < \varphi_2$, поступающими с задатчика допустимой относительной влажности воздуха 20.

Релейный блок 16 имеет релейную выходную характеристику. При $\varphi > \varphi_2$ блок 16 выдает в блок 15 команду на включение продувки, при $\varphi < \varphi_1$ блок 16 выдает команду на отключение продувки. Таким образом, продувка кузова 17 ведется до тех пор, пока относительная влажность в нем не упадет от φ_2 до φ_1 .

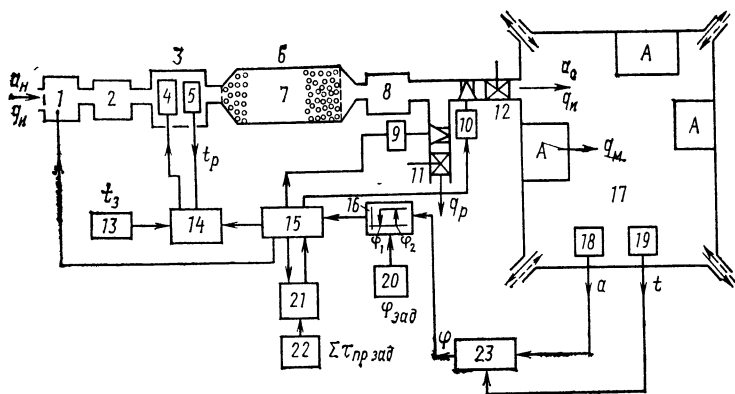


Рис. 5.14. Структурная схема установки автоматической стабилизации влажности воздуха в кузове (← — продувка; ← — — — натекание атмосферного воздуха)

По окончании продувки блок 15 выключает нагнетатель 1 и закрывает клапан 10, наступает режим «Пауза» в течение которого влажность воздуха внутри кузова 17 постепенно повышается за счет натекания в кузов снаружи атмосферного воздуха через щели.

Изменение влажности воздуха внутри кузова при работе системы автоматического регулирования показано на рис. 5.15.

Когда влажность в кузове достигнет уровня φ_2 , вновь включается продувка и процессы повторяются.

С блоком 15 (см. рис. 5.14) связаны блок 21 суммирования общего времени нескольких продувок и задатчик 22 суммарного времени продувок; в блоке 21 суммируется общее время следующих друг за другом продувок, выполняемых после регенерации сорбента (τ_{2-3} , τ_{4-5} , τ_{6-7}); когда это суммарное время достигнет разрешенного времени продувок (это означает, что сорбент 7 в адсорбере уже на 70...80% своей длины, начиная слева, увлажнился и необходима его регенерация), то из блока 21 выдается в блок 15 команда на ре-

генерацию сорбента. Блок 15 в этом случае, закончив очередную продувку (например, τ_{6-7}), в режиме «Пауза» выдает команды на регенерацию сорбента 7.

Время регенерации τ_p задается заранее и закладывается в программу (память) блока 15 ($\tau_p = 5 \dots 6$ ч); температура регенерации t_p задается такой, чтобы остаточная влажность сорбента β_0 после регенерации была равновесна принятому значению a_0 ; значение же a_0 принимается таким, чтобы соответствующее ей значение φ_0 было, по крайней мере, вдвое меньше, чем φ_1 во всем диапазоне рабочих тем-

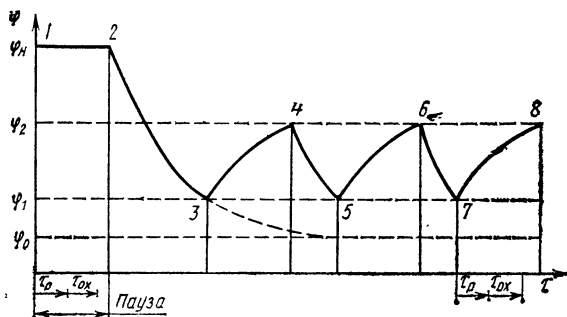


Рис. 5.15. Изменение влажности воздуха внутри кузова при автоматическом регулировании

ператур t кузова. Расход воздуха при регенерации задается заранее и устанавливается задвижкой 11.

По окончании регенерации блок 15 выдает команду на естественное охлаждение адсорбера. Продолжительность охлаждения $\tau_{ох}$ задается заранее такой, чтобы произошло естественное охлаждение сорбента 7 до температуры окружающего воздуха (достаточно $5 \dots 6$ ч). Это значение $\tau_{ох}$ закладывается в программу (память) блока 15 и только через интервал времени, равный или больший $\tau_p + \tau_{ох}$, данный блок может выдать команду на следующую продувку.

Возможности и ограничения в системе автоматического регулирования влажности. В основе работы рассматриваемой системы лежат процессы осушения и увлажнения воздуха внутри герметизированного объема; аналитическое описание этих процессов рассмотрено в гл. 4, а уравнение (4.85) описывает изменение влажности воздуха внутри кузова в результате этих процессов; ниже указаны их особенности.

1. Режим паузы между продувками. Длительность паузы между продувками должна быть не меньше суммы времен регенерации и охлаждения адсорбера, иначе адсорбер после регенерации не будет готов к осушению воздуха.

2. Р е г е н е р а ц и я. Регенерацию сорбента надо проводить до остаточной влажности β_0 , равновесной с a_0 , где $a_0 \approx 0,5 a_1$. Для этого необходимо посредством датчика задавать соответствующую температуру t_3 . Заметим здесь, что адсорбер должен быть размещен вертикально, а воздух продуваться снизу вверх; это исключит возможность появления в сорбенте больших воздушных мешков (у горизонтально расположенного адсорбера это возможно).

3. П р о д у в к а. Продувка должна проводиться с расходом q_n , несколько превышающим значения q_m , что обеспечит сравнительно быстрое снижение влажности воздуха при продувке; можно принять $q_n \approx 2q_m$.

4. Р а б о т а а д с о р б е р а. Влажностная емкость адсорбера выбирается такой, чтобы после каждой регенерации можно было провести три — четыре продувки.

В качестве материала сорбента лучше использовать мелкопористый силикагель.

5. Р а б о т а д а т ч и к а в л а ж н о с т и в о з д у х а. В системе, показанной на рис. 5.14, использован датчик абсолютной влажности воздуха. Следует отметить, что пока нет достаточно надежных и простых по устройству датчиков влажности, предназначенных для работы в автоматических системах (с унифицированным электрическим выходом).

В данной системе можно использовать также и датчик относительной влажности воздуха φ ; в этом случае нет надобности в блоках 19 и 23; выход такого датчика должен непосредственно подаваться на вход блока 16.

В случае отсутствия датчика влажности следует вместо установки со схемой, приведенной на рис. 5.14, применять установку со схемой, показанной на рис. 5.12.

1. Блютген И. География климатов. Пер. с нем. Т. 1. М.: Прогресс, 1972. 430 с.
2. Бэррер Р. Диффузия в твердых телах. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1948. 504 с.
3. Диткин В. А., Прудников А. П. Операционное исчисление. М.: Высшая школа, 1975. 407 с.
4. Доценко Н. С., Соболев В. В. Долговечность элементов радиоэлектронной аппаратуры. Л.: Энергия, 1973. 160 с.
5. Защита радиоэлектронной аппаратуры от влияния климатических условий / Под ред. Г. Юбиша. Пер. с нем. М.: Энергия, 1970. 368 с.
6. Игумнов Н. И., Панфилов Г. И. Нестационарный влагообмен плоской стенки при обдуве ее потоком воздуха // Идентификация, автоматический контроль и моделирование сложных процессов и объектов управления. Днепропетровск: ДГУ, 1983. С. 167—172.
7. Игумнов Н. И. Расчет динамических параметров влагопоглощающих патронов. М.: Деп. ВИНТИ. 1981, № 6, 6/о 500.
8. Игумнов Н. И. Обоснование и выбор влагопоглощающих патронов для герметизированных упаковок при диффузионном перетекании влаги. М.: Деп. ВИНТИ. 1981, № 6, 6/о 493.
9. Игумнов Н. И. Теория работы и расчет проточного влагопоглощающего патрона // Идентификация, автоматический контроль и моделирование сложных процессов и объектов управления. Днепропетровск: ДГУ, 1985. С. 133—140.
10. Игумнов Н. И. Некоторые вопросы продувки прибора сухим воздухом // Динамика систем и устройств автоматического управления. Днепропетровск: ДГУ, 1975. С. 165—167.
11. Игумнов Н. И., Кутумов В. А. О влиянии качества герметизации аппаратуры на ее надежность // Основные направления в развитии радиоэлектроники, вычислительной техники и связи: Материалы Укр. респ. научно-техн. конф. Вып. 3. Киев, 1973. С. 40—41.
12. Игумнов Н. И., Ярмоленко Н. М. Натекание атмосферного воздуха в квазигерметичные приборы // Автоматизация и радиоэлектроника. Днепропетровск: ДГУ, 1974. С. 137—144.

13. Игумнов Н. И. Применение аналогии между процессами передачи влаги и электричества к решению нестационарных задач влагообмена // Идентификация, автоматический контроль и моделирование сложных процессов и объектов управления. Днепропетровск: ДГУ, 1983. С. 158—166.

14. Кантро Д., Брунауэр С., Коупленд Л. Определение площади поверхности по методу Брунауэра, Эмметта и Теллера (БЭТ) и истолкование результатов // Межфазовая граница газ — твердое тело / Под ред. Э. Флада. Пер. с англ. М.: Мир, 1970. С. 347—358.

15. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 904 с.

16. Мартыненко В. С. Операционное исчисление. Киев: Вища школа, 1973. 267 с.

17. Михайлов М. М. Влагопроницаемость органических диэлектриков. М.: Госэнергоиздат, 1960. 163 с.

18. Розенфельд И. Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургиздат, 1970. 448 с.

19. Серпионова Е. Н. Промышленная адсорбция газов и паров. М.: Высшая школа, 1969. 415 с.

20. Стеризат М. С. Метеорологические приборы и измерения. Л.: Гидрометиздат, 1978. 392 с.

21. Стил У. Уравнение состояния адсорбированного вещества // Межфазовая граница газ — твердое тело / Под ред. Э. Флада; Пер. с англ. М.: Мир, 1970. С. 260—315.

22. Тареев Б. М., Яманова Л. В., Волков В. А., Ивлиев В. В. Герметизация полимерными материалами в радиоэлектронике. М.: Энергия, 1974. 303 с.

23. Телеснин Р. В. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1981. 360 с.

24. Техническая кибернетика. Кн. 1. Измерительные устройства, преобразующие элементы и устройства. М.: Машиностроение, 1973. 671 с.

25. Тимофеев Д. П. Кинетика адсорбции. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 252 с.

26. Фролов А. Д. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Высшая школа, 1970. 486 с.

27. Холмс Дж. Теплоты адсорбции // Межфазовая граница газ — твердое тело / Под ред. Э. Флада. Пер. с англ. М.: Мир, 1970. С. 115—128.

Предисловие	3
ГЛАВА 1. Воздух окружающей среды	5
1.1. Состав	5
1.2. Температура	5
1.3. Атмосферное давление	8
1.4. Ветер	9
1.5. Влажность	9
ГЛАВА. 2 Действие влажного воздуха на аппаратуру . . .	13
2.1. Физика процессов на границе газ — твердое тело	13
2.2. Действие влаги на элементы аппаратуры . . .	17
2.3. Оптимальная по надежности влажность воздуха	21
ГЛАВА 3. Воздухообмен прибора с окружающей средой через щели в оболочке	23
3.1. Постановка вопроса	23
3.2. Перетекание воздуха через щели	24
3.3. Уровень герметичности кузовов и других аппаратов	29
3.4. Интенсивность воздухообмена между прибором и окружающей средой	34
3.5. Рекомендации по уровням герметичности приборов	39
3.6. Пример расчета объема воздуха, перетекающего через щели в кузове	41
ГЛАВА 4. Влагообмен элементов аппаратуры с окружающей средой	43
4.1. Замечания о влагообмене элементов аппаратуры с окружающей средой	43
4.2. Количественная характеристика влагопоглощения материалов	47
4.3. Аналогия процессов переноса влаги и электричества	48

4.4. Расчетные схемы переноса влаги в элементах аппаратуры	54
4.5. Влагообмен плоской стенки с окружающей средой. Классическая теория	55
4.6. Влагообмен плоской стенки с окружающей средой. Приближенные решения	60
4.7. Влагообмен плоской стенки с окружающей средой при переменных параметрах среды	62
4.8. Теория влагообмена для типовых нестационарных задач	68
ГЛАВА 5. Устройства и системы регулирования влажности	87
5.1. Вводные замечания	87
5.2. Краткое описание способов и устройств регулирования влажности	89
5.3. Статическое осушение. Постановка задачи	91
5.4. Оценка поглощения влаги различными конструктивными элементами прибора	92
5.5. Влагопоглотители	98
5.6. Влагопоглощающие патроны	99
5.7. Системы статического осушения	110
5.8. Динамическое осушение, автоматическое регулирование влажности	114
Список литературы	132

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Игумнов Николай Иванович

ВЛАГООБМЕН В ПРИБОРАХ И АППАРАТАХ

Редактор А. В. Лысенко

Художественный редактор А. С. Вершинкин

Технический редактор Л. П. Гордеева

Корректор Т. В. Багдасарян

ИБ № 6009

Сдано в набор 21.04.88.

Подписано в печать 05.06.89. Т-08043.

Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2.

Гарнитура литературная. Печать высокая.

Усл. печ. л. 7,14 Усл. кр-отт. 7,27. Уч.-изд. л. 7,55:

Тираж 3100 экз. Заказ 232. Цена 40 к.

Ордена Трудового Красного знамени издательство «Машиностроение»,
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Типография журнала «Пограничник»

40 коп.



«МАШИНОСТРОЕНИЕ»