

К ВОПРОСУ ОБ ОСУШЕНИИ ВОЗДУХА В СИСТЕМЕ
АВТОМАТИЧЕСКИХ ТОРМОЗОВ*И. В. Геблер и С. С. Максимова*

Известно, что влажность тормозного воздуха нередко влечет за собой неправильную работу тормозов, главным образом в зимнее время, когда в холодную магистраль воздух из главного резервуара может поступать с более высокой температурой, будучи нагретым в главном резервуаре вследствие компрессии при работе насоса и с большим содержанием влаги против атмосферного—вследствие сжатия в 8—9 раз. В более холодной магистрали и тормозных приборах воздух в отношении содержания влаги может оказаться пересыщенным и в результате происходит выпадение излишней влаги в виде снега и льда, что и приводит к замерзанию тормозов.

Для того, чтобы получить представление о количестве могущей выпадать влаги, возьмем пример. Пусть температура наружного воздуха -10°C , при относительной влажности $=75\%$. В таблице насыщенности водяного пара (Hütte и др.) находим, что абсолютная влажность воздуха при -10° составляет $2,51 \text{ г/м}^3$. Следовательно, при 75% насыщении содержание влаги будет:

$$2,51 \cdot 0,75 = 1,73 \text{ г/м}^3.$$

Если воздух в главном резервуаре имеет абсолютное давление $=9 \text{ ата}$, то на каждый кубический метр сжатого воздуха приходится $1,73 \times 9 = 15,57 \text{ г}$ влаги. Такое содержание влаги отвечает абсолютной влажности примерно около $+18^{\circ}$. Таким образом в главном резервуаре влага не будет конденсироваться в том случае, если температура в нем не менее $+18^{\circ}$, и если торможение происходит в таких условиях, то в магистраль будет поступать воздух с указанным содержанием влаги. Если же в главном резервуаре температура будет ниже $+18^{\circ}$, то часть влаги сконденсируется, воздух же будет иметь 100% насыщение, соответствующее данной температуре, так как он будет находиться в соприкосновении с водой. Следовательно, количество влаги, поступающей при торможении в магистраль, будет зависеть от температуры в главном резервуаре.

Положим, что в главном резервуаре воздух имеет температуру $+10^{\circ}$, чему отвечает абсолютная влажность $=9,39 \text{ г/м}^3$. Если температуру магистрали принять равной температуре внешнего воздуха, г. е. в данном случае $=-10^{\circ}$, а давление $=5 \text{ ата}$, то относительная влажность воздуха магистрали будет:

$$\frac{5,9,39 \left(1 + \frac{10}{273} \right)}{9,2,31 \cdot \left(1 - \frac{10}{273} \right)} = 2,42 \text{ или } 242\%.$$

Этому отвечает абсолютное количество влаги $= 5,59 \text{ г/м}^3$. Следовательно, на 1 м^3 магистрального воздуха сконденсируется: $5,59 - 2,31 = 3,28 \text{ г}$ воды.

Один куб. метр воздуха из главного резервуара с давлением в 9 атм с $T = +10^\circ$ даст магистрального воздуха ($p = 5 \text{ атм}$, $T = -10^\circ$):

$$\frac{9 \cdot \left(1 - \frac{10}{273}\right)}{5 \cdot \left(1 + \frac{1}{273}\right)} = 1,67 \text{ м}^3.$$

С другой стороны, 1 куб. м атмосферного воздуха ($p = 1$, $T = -10^\circ$) даст

воздуха с состоянием в главном резервуаре: $\frac{1 + \frac{10}{273}}{9 \cdot \left(1 - \frac{10}{273}\right)} = 0,12 \text{ м}^3$. От-

сюда на 1 куб. м атмосферного воздуха в данных условиях будет конденсироваться:

$$3,28 \times 1,67 \times 0,12 = 0,66 \text{ г}.$$

Принимая расход атмосферного воздуха в $40 \text{ м}^3/\text{час}$. находим, что в условиях взятого примера, в магистрали будет конденсироваться: $0,66 \times 40 = 26,4 \text{ г}$ воды в час. При снижении температуры в главном резервуаре влажность воздуха, находящегося в нем, а следовательно и поступающего в магистраль, соответственно уменьшается. Поэтому стремятся понизить температуру в главном резервуаре.

Инж. Корвацкий считает, что эта температура не должна превышать температуру наружного воздуха более, чем на $3-4^\circ$, что соответствует относительной влажности воздуха в магистрали не более 85% , в крайнем случае на 5° ¹⁾, и для достижения этого предлагает удлинить нагнетательную трубу между насосом и главным резервуаром до $10-15 \text{ м}$ („охлаждающая петля“).

Принимая разность температур между воздухом в главном резервуаре и наружным в среднем $= 5^\circ$ для предыдущего примера будем иметь: температура воздуха в главном резервуаре $-10^\circ + 4^\circ = -6^\circ$; абсолютная влажность воздуха при этой температуре—по таблицам $= 3,13 \text{ г/м}^3$. Аналогично предыдущему находим, что относительная влажность воздуха в магистрали будет:

$$\frac{5 \cdot 3,13 \cdot \left(1 - \frac{6}{273}\right)}{9 \cdot 2,31 \cdot \left(1 - \frac{10}{273}\right)} = 0,76 \text{ или } 76\%$$

и, следовательно, конденсации не будет.

Если ставить целью отсутствие конденсации в магистрали при более высоких температурах воздуха в главном резервуаре, имея в виду, что охлаждающего действия удлиненной трубы будет недостаточно, например при форсированной работе компрессора, что может иметь место в отдельных случаях, то тогда может быть поставлен вопрос об обезвоживании тормозного воздуха иными способами.

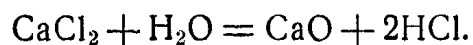
¹⁾ Вагонное хозяйство. 1935 г. № 8—9.

Способами, наиболее употребительными для осушения воздуха, вообще говоря, являются следующие: сжатие с одновременным охлаждением, промывка воздуха гигроскопическими жидкостями, поглощение влаги из воздуха твердыми поглотителями. Первый из этих способов является, очевидно, неприемлимым, так как в процессе подготовки воздуха пришлось бы применить интенсивное охлаждение, чтобы иметь во всякий момент воздух в надлежащей степени обезвоженным, что в условиях тормозной установки неудобно в связи с усложнением аппаратуры. Совершенно не пригоден и второй способ с применением жидких поглотителей (растворы хлористого кальция, глицерин), который иногда употребляется для осушения воздуха и газов в стационарных установках. В этом случае необходимо постоянство внешней температуры и регенерация поглотителей, которая является довольно сложной и громоздкой операцией и требует особых установок.

Единственным способом, о котором можно говорить, как о возможном для данной цели, является применение твердых осушителей. Такие вещества поглощают влагу либо вследствие образования гидратов, либо на основе адсорбции, обладая способностью понижать упругость водяного пара в соприкосновении с влажным газом. К таким твердым поглотителям влаги прежде всего относится хлористый кальций (CaCl_2), широко применяющийся в лабораториях для осушения газов. Технический продукт является весьма доступным, составляя отход содового производства и скопляясь в больших количествах на содовых заводах, работающих по аммиачному способу.

Безводный хлористый кальций (CaCl_2) и его 2-водный гидрат ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) хорошо поглощают влагу, переходя в шестиводный гидрат ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Воды при этом поглощается больше, чем требуется для образования кристаллогидрата $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, так как последний также обладает гигроскопичностью и расплывается при дальнейшем поглощении влаги. В результате образуется полужидкая масса, которая при повышенной температуре становится вполне жидкой, так как шестиводный гидрат плавится при 30° .

В связи с этими свойствами можно ожидать затруднений при регенерации поглотившего влагу хлористого кальция непосредственно в тормозной установке при помощи перегретого пара, имея в виду разжижение массы и забивку ею воздухоподводящих отверстий осушительного фильтра при возрастании вместе с тем сопротивлений для прохождения пара. Кроме того, обезвоживание хлористого кальция при регенерации должно, по видимому, идти лишь до образования двухводного гидрата при нагревании не выше 200° , так как при более высокой температуре образование безводного CaCl_2 сопровождается его частичным разложением с образованием соляной кислоты по уравнению:



Незначительные количества хлористого водорода при последующем пропуске воздуха могут попасть в тормозную магистраль, что очевидно совершенно недопустимо в виду сильного коррозирующего действия хлористого водорода на металлы. Держать же определенный температурный режим при регенерации в условиях тормозной установки, вероятно, было бы затруднительным.

Более удобными должны оказаться вещества, поглощающие влагу в условиях адсорбции. Одним из лучших гидрофильных (поглощающих воду) сорбентов в настоящее время является „силикагель“. Так называется продукт, представляющий собою обезвоженный гель кремневой кислоты (коллоидная кремнекислота), приготовляемый путем обработки соляной кислотой раствора силиката натрия и последующей сушки полученного

теля¹⁾). Силикагель представляет собою твердый продукт, по внешнему виду напоминающий кварц, но обладающий значительно меньшим удельным весом благодаря присутствию большого количества капиллярных пор ультрамикроскопического размера. Эта пористость и составляет специфическую особенность силикагеля, обуславливая громадную поверхность, в силу чего происходят такие поверхностные явления, как поглощение паров воды или других летучих веществ (бензол, ацетон и пр.), а также и газов. Твердость силикагеля 5 (по шкале Мооса), насыпной вес около 0,6.

Поглотительная способность силикагеля очень велика. Он может поглощать воды до 50% и больше по отношению к собственному весу, при этом поглощение может протекать при низких концентрациях водяного пара в воздухе. Весьма важным является то обстоятельство, что силикагель, поглотивший влагу, легко может быть регенерирован, что осуществляется путем продувки влажного силикагеля горячим воздухом или перегретым паром с температурой 250—350°, после чего он вновь получает способность поглощать воду с прежней энергией. В силу этого силикагель применяется в технике для осушения иногда очень больших количеств воздуха и некоторых технических газов. Так, например, имеются установки для осушения при помощи силикагеля воздуха, подаваемого в доменные печи²⁾, а также коксового или светильного газа³⁾.

С принципиальной точки зрения применение силикагеля для обезвоживания из воздуха в тормозных установках вполне возможно, благодаря его высоким адсорбционным свойствам по отношению к воде и легкости регенерации; последнее особенно важно в данном случае. Далее, имеет также большое значение возможность работ с силикагелем при низких температурах. Учитывая свойства силикагеля, можно предполагать несложность дополнительной установки и простоту работы.

В связи с этим, автором настоящей статьи был выдвинут вопрос об осушении тормозного воздуха при помощи силикагеля. Не будучи специалистом в области железнодорожных тормозов, автором в октябре 1936 г. был сделан доклад в Томском Транспортном Институте при кафедре вагонов в присутствии специалистов. В докладе была изложена теоретическая сторона вопроса, а также результаты предварительных опытов, сделанных автором в его лаборатории в ТИИ. При обсуждении доклада были высказаны положительные суждения по существу сделанного предложения, которое вызвало значительный интерес и пожелание произвести более подробное исследование вопроса первоначально в лаборатории, а затем на тормозной установке в Транспортном Институте и далее на паровозе.

Исследовательская работа была организована и выполнена в лаборатории Томской ж. дороги. В нижеследующем излагаются ее результаты.

Имея в виду, что свойства силикагеля, вообще говоря, известны, при настоящем исследовании необходимо было провести испытание силикагеля для осушения воздуха применительно к работе автотормозов, а именно при различных температурах и влажности воздуха, определенной объемной скорости его, соответствующей производительности воздушного насоса или выпуску в магистраль на торможение, в отношении необходимого количества сорбента на тормозную установку, условий его реге-

¹⁾ О получении и свойствах силикагеля см.: Окатов. Коллоидная кремнекислота и ее свойства. Ж. Прикл. Химии 2,21 (1928); Хармандарини Канелевич. Получение активного силикагеля. Ж. Хим. Пром., 7, 1484, (1930); „Силикагель”—сборник переводн. статей под ред. Б. П. Брунса (1932); Frydlander. Силикагель, его получение, свойства и применение. Rev. de probuit. chim* 43,97 (1924); Fells and Firth. Условия получения и свойства силикагеля. S. Phys. Ch.* 39,242 (1925).

²⁾ Zeitschr. des. Verein. deutscher Ingeniere. 70,8. 907 (1936).

³⁾ Cas Age-Record. 1926, 1.

нерации, времени работы сорбента в первом цикле и, наконец, места установки обезвоживающего фильтра в тормозной коммуникации. В лабораторной обстановке опыты производились в малом масштабе в условиях подобия того, что имеет место в тормозных установках. Воздух брался в литрах, силикагель в граммах. Силикагель для опытов всегда употреблялся в измельчении, соответствующем прохождению через сито с отверстиями в 1 мм, причем из продукта, измельченного до этой степени, мелочь и пыль удалялись просеиванием через сито с 400 отв/см². Объемный (насыпной) вес силикагеля в таком гранулометрическом составе был около 0,60 г/см³. Истинный же удельный вес его был равен 1,02.

После измельчения силикагель активировался нагреванием при 400° в продолжении двух часов и в таком состоянии употреблялся для опытов. Опыты производились следующим образом. Силикагель помещался в U-образную трубку, через которую пропусклся воздух; по привесу трубки определялось количество поглощенной влаги, которое рассчитывалось по отношению к весу силикагеля и к воздуху, влажность которого была известна.

Эффект поглощения влаги из воздуха силикагелем зависит от ряда факторов. Он увеличивается с понижением температуры и с повышением концентрации водяных паров в воздухе. Увеличивается также с увеличением поверхности сорбента, иначе говоря с уменьшением величины его зерен.

Далее, большое значение в отношении эффекта поглощения влаги имеет линейная скорость воздуха в контактном аппарате, так как ею определяется время соприкосновения между отдающим влагу воздухом и воспринимающим влагу сорбентом при одинаковой высоте слоя последнего. С другой стороны, эта высота слоя является фактором, также влияющим на время контакта. Последнее представляет собою одно из условий, определяющих эффект поглощения, и зависит следовательно от линейной скорости воздуха в контактном аппарате и от высоты слоя сорбента.

Пусть (фиг. 1) имеем контактный аппарат, представляющий собою цилиндр с диаметром d м; между плоскостями АВ и CD находится сорбент, высота слоя которого $= h$ м. Вход и выход воздуха указан стрелками. Объемная скорость воздуха $= Q$ м³/сек. Если свободную площадь сечения внутри контактного слоя назовем ω , то линейная скорость воздуха внутри этого слоя будет:

$$V = \frac{Q}{\omega} \text{ м/сек.},$$

а время контакта τ определится из выражения

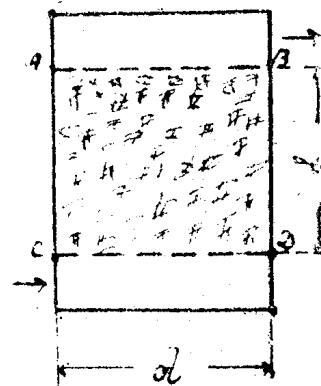
$$\tau = \frac{h}{v} = \frac{\omega h}{Q}. \quad (1)$$

Если увеличим высоту слоя в два раза, то будем иметь:

$$\tau_1 = \frac{2\omega h}{Q} = 2\tau.$$

При увеличении в два раза свободной площади сечения имеем:

$$v_1 = \frac{Q}{2\omega} \text{ и } \tau = \frac{h}{v_1} = \frac{2\omega h}{Q} = 2\tau.$$



Фиг. 1.

Таким образом, для увеличения времени контакта можно увеличить либо высоту слоя сорбента, либо площадь свободного сечения. Но так как при увеличении высоты слоя увеличивается гидравлическое сопротивление аппарата, то целесообразнее увеличивать площадь сечения. Впрочем, последняя имеет значение лишь при малых давлениях, в системе порядка 1/10 — 1/5 ат.

Свободная площадь сечения внутри слоя сорбента определяется из выражения:

$$\omega = \frac{G}{h} \cdot \left(\frac{1}{i} - \frac{1}{d} \right), \quad (2)$$

где G — вес сорбента (кг);
 h — высота слоя (кг) м;
 i — объемный вес (кг/м³);
 d — истинный удельный вес.

Эффект поглощения зависит, кроме времени контакта, еще от характера движения воздуха в зависимости от скорости (струйчатость, завихрения) и изменяется не пропорционально площади свободного сечения. То же можно сказать и про высоту слоя сорбента, что находится в связи с уменьшением концентрации водяных паров при прохождении слоя.

Первоначально были поставлены опыты с воздухом, насыщенным при данной температуре, для чего воздух на осушитель подавался из водяного газометра с объемной скоростью около 50 л/час. Такая скорость ориентировочно была взята в соответствии с тем, что часовой расход воздуха в тормозах составляет (по „Тормозному справочнику“) около 40 м³, и увеличена до указанной цифры в лабораторном масштабе.

Опыт 1.

Площадь поперечного сечения трубки с силикагелем в свету . . . 0,61 см²
 Площадь свободного сечения 0,26 см²
 Высота слоя силикагеля 13,30 см.
 Вес силикагеля 4,7 г.
 Объемная скорость воздуха 51 л/час.
 Линейная скорость воздуха в трубке $V = 0,54$ м/сек.
 Время контакта $\tau = 0,246$ сек.
 Температура воздуха 13°C.

Таблица 1.

Ч а с ы	П о г л о щ е н о в л а г и			
	Всего мг	От веса сухого силикагеля %	На 1 л. воздуха мг	От влаги, содержащейся в воздухе (приблизительный)
1-ый	543	11,5	11,0	72
2-ой	329	7,0	6,4	42
3-ий	236	4,8	4,4	29
4-ый	164	3,5	3,2	21

Опыт 2.

Площадь поперечного сечения трубки с силикагелем в свету 1,35 см².
 Площадь свободного сечения 0,54 см².
 Высота слоя силикагеля 13,7 см.
 Вес силикагеля 10 г.

Объемная скорость воздуха 51 л/час.
 Линейная скорость воздуха в трубке $V=0,26$ м/сек.
 Время контакта $\tau=0,527$ сек.
 Температура воздуха $t \sim 8^\circ$.

Таблица II

Ч а с ы	П о г л о щ е н о в л а г и			
	Всего мг	От веса сухого сили- кагеля %	На 1 л. воздуха мг	От влаги, содер- жащейся в воз- духе (прибли- зительный)
1-ый	778	7,8	15,2	99
2-ой	464	4,6	9,1	59
3и-й	329	3,3	6,4	42
4-ый	214	2,1	4,2	27

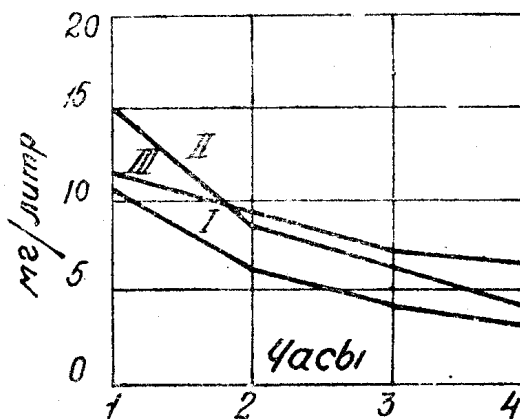
Опыт 3.

Площадь поперечного сечения трубки с силикагелем
 в свету 0,61 см².
 Площадь свободного сечения 0,26 см².
 Высота слоя силикагеля 26,6 см.
 Вес силикагеля 9,4 г.
 Объемная скорость воздуха 51 л/час.
 Линейная скорость воздуха в трубке 0,54 м/сек.
 Время контакта $\tau=0,492$ сек.
 Температура воздуха $t \sim 18^\circ$

Таблица III

Ч а с ы	П о г л о щ е н о в л а г и			
	Всего мг	От веса сухого сили- кагеля %	На 1 л. воздуха мг	От влаги, содер- жащейся в воз- духе (прибли- зительный)
1-ый	607	6,4	11,9	75
2-ой	494	5,8	9,7	63
3-ий	365	3,9	7,2	47
4-ый	320	3,4	6,3	41

Результаты всех трех опытов для цифр предпоследней графы пред-
 ставлены на фиг. 2. Как видно, коли-
 чество поглощенной влаги во всех слу-
 чаях уменьшается с каждым часом.
 Другими словами, адсорбционная спо-
 собность силикагеля падает по мере его
 увлажнения, хотя это увлажнение, со-
 ставляя максимум 7,8% от веса сорбента,
 далеко от предельного. Опыты произ-
 водились при одинаковых, приближи-
 тельно, температуре и концентрации
 водяных паров в воздухе, изменялось
 же время контакта: во втором опыте оно
 увеличено кругло в два раза путем со-
 ответствующего увеличения площади
 свободного сечения при сохранении оди-
 наковой высоты слоя, в третьем опыте такое же увеличение времени



Фиг. 2.

контакта достигнуто обратным приемом—увеличена вдвое высота слоя, площадь свободного сечения оставлена такой же, что и в первом опыте. Общее количество поглощенной влаги за все часы составляет на 1 л воздуха:

I опыт: 25 мг/л.

II опыт: 34,9 „

III опыт: 35,1 „

Таким образом увеличение времени контакта в 2 раза дает в обоих случаях практически одинаковые цифры, причем общее количество поглощенной влаги увеличивается кругло на 40%. Но процесс поглощения идет несколько неодинаково, а именно, в третьем опыте при большей высоте слоя в последующие часы после первого влаги поглощается больше, что происходит вследствие того, что более удаленные по ходу воздуха участки слоя сорбента первоначально меньше воспринимают влаги, которая больше адсорбируется в частях, находящихся ближе ко входу воздуха.

Итак, если вести поглощение в течение одного часа, то гораздо выгоднее увеличивать площадь сечения адсорбционного сосуда; если первый цикл работы (до регенерации) вести в продолжение 4-х часов, то, в отношении эффекта поглощения, для повышения его, как видно, выгоднее увеличивать высоту слоя, так как при этом в последний час поглощение больше.

Результаты опытов, произведенных в указанных условиях, дают основания для расчета размеров адсорбционного осушителя и количества сорбента на тормозную установку (см. ниже).

В дальнейшем многочисленный ряд опытов был проведен при различных температурах и концентрациях влаги в воздухе, но всегда в условиях обстановки опыта 2, т. е. при свободной площади сечения в трубке = 0,54 см², высота слоя = 13,7 см, времени контакта + 0,5 м/сек и количестве силикагеля 10 г. В случаях употребления воздуха с произвольной влажностью (комнатный, наружный), последняя определялась по точке росы с помощью эфирного гигрометра Алюара. Показания гигрометра в отдельных случаях сравнивались с данными аналитического определения влаги в воздухе поглощением ее в трубках с H₂SO₄ или P₂O₅.

Опыт поглощения влаги при температуре +45° и полном насыщении (65, 14 мг/л) дал такие результаты для 1-го часа.

Таблица IV

мг	Поглощено влаги		
	От веса сухого силикагеля %	На 1 л. воздуха мг	От влаги, со- державшейся в воздухе (%)
1227,2	12,3	24,1	37

Степень поглощения, следовательно, в этом случае значительно более, чем при T + 18°, что обуславливается большей концентрацией водяных паров. Однако, процент удаляемой влаги слишком мал. Для увеличения этого пришлось бы употреблять значительно большие количества сорбента. Поэтому, при столь высокой температуре, применение силикагеля, очевидно, не выгодно, и опыты поглощения в следующие часы не представляли интереса.

При температуре между +6,5 и +7,5° и полном насыщении результаты получены следующие:

Таблица V.

Часы	Поглощено влаги			
	Всего мг	От веса сухого силикагеля %	На 1 л. воздуха мг	От влаги, со- державшейся в воздухе (%)
1-ый	550,0	3,50	7,00	90,6
2-ой	332,0	3,32	6,64	85,5
3-ий	328,5	3,28	6,57	84,6
4-ый	300,0	3,00	6,00	76,5

По сравнению с эффектом поглощения при $+18^{\circ}$ (табл. III) видим, что в 1-ый час степень поглощения меньше в связи с меньшей концентрации влаги в воздухе, но в последующие часы относительно гораздо больше и, следовательно, процесс идет более благоприятно.

Степень поглощения при одинаковых температурах, но разных концентрациях, характеризуется, в сопоставлении с результатами опыта 2, следующими данными опыта поглощения при температуре воздуха $+18^{\circ}$ с относительной влажностью 36, 58% (5,6 мг/л).

Таблица VI.

Часы	Поглощено влаги			
	Всего мг	От веса сухого силикагеля %	На 1 л. воздуха мг	От влаги, со- державшейся в воздухе при- близит. %
1-ый	255	2,5	5,1	91
2-ой	140	1,4	2,8	44

Т.-е. эффект поглощения несколько ниже, в связи с более низкой концентрацией водяных паров.

При температурах ниже 0° опыты производились с наружным воздухом. Для этого трубка с силикагелем помещалась за окном и при помощи каучука, проходящего через отверстие в раме, соединялась с газометром, находящимся в помещении и наполненном водой. Из газометра выпускалась вода, и воздух с надлежащей скоростью просасывался через поглотительную трубу. Такие опыты показали, что при низких температурах количество удаляемой влаги, по отношению к тому, которое имеется в воздухе, является наибольшим, и в первые два часа пропускания воздуха через поглотитель удаляется около 100% влаги, как это можно видеть из следующих примеров:

Таблица VII.

Часы	Температура и относительная влажность воздуха	Поглощено влаги			
		Всего мг	От веса сухого силикагеля (%)	На 1 л. воздуха мг	От влаги, содержащейся в воздухе прибл. (%)
1-ый	Темп. = -20°	47,4	0,5	0,95	100
2-ой	Отн. влажность = 90,4 %	45,5	0,4	0,90	95
3-ий	Темп. = -15°	54,6	0,5	1,09	77
4-ый	Отн. влажность = 88,6 %	40,0	0,4	0,80	57
1-ый и 2-ой	Темп. = $-14,5^{\circ}$ Отн. влажность = 76 %	62,0	0,6	1,25	100

Это обстоятельство является благоприятным имея в виду, что обезвоживание тормозного воздуха особенно необходимо при низких температурах.

Регенерация содержащего влагу силикагеля может производиться продуванием его нагретым воздухом или перегретым паром. Для тормозной установки, конечно, следует иметь в виду перегретый пар, поэтому соответствующие опыты проводились только с перегретым паром.

Продувка паром влажного силикагеля производилась после опытов поглощения, в той же трубе. Пар, получаемый в парообразователе, пропусклся через медный змеевик, обогреваемый горелкой, и затем поступал в трубку при обыкновенном давлении.

Опыты показали, что при температуре пара $= 150^\circ$ в силикагеле остается около 0,5—0,6% влаги, т.е. регенерация оказывается неполной. При температуре пара 250° — влага удаляется полностью при продувке в продолжение 20 минут. Пар с температурой $200—300^\circ$ давал тот же эффект в продолжение 15 минут. Количество пара составляет приблизительно около 2 г на 1 г силикагеля (сухого).

Ввиду несовершенной обстановки и отсутствия некоторых точных приборов в лаборатории Томск. ж. д., не приспособленной для физико-химических работ, опыты производились не в тех условиях, как это было бы желательно; поэтому полученные цифры не могут претендовать на большую точность. Тем не менее, они являются достаточными для предварительного суждения о целесообразности применения силикагеля для осушения тормозного воздуха и для соответствующих ориентировочных расчетов, к чему и переходим.

III.

В тормозной коммуникации усматривается два пункта, в которых можно предположить установку адсорбера: 1) во всасывающей линии перед компрессором, непосредственно за пылевым фильтром, и 2) в линии между главным резервуаром и краном машиниста (непосредственно за главным резервуаром) В нагнетательной линии между компрессором и главным резервуаром возможность установки, очевидно, отпадает, так как воздух здесь содержит все тепло компрессии и имеет температуру, вообще говоря, выше 100° .

При установке адсорбера в первом из указанных пунктов следует иметь в виду, что влажность тормозного воздуха зависит только от состояния воздуха в главном резервуаре, где происходит уменьшение объема воздуха, увеличение концентрации влаги и выпадение ее избытка в виде конденсата. В связи с этим, удаление влаги из наружного воздуха, нагнетаемого в главный резервуар, должно осуществляться настолько, чтобы в главном резервуаре устанавливалась влажность, при которой не имела бы места конденсация в магистрали, что находится в связи с температурой в главном резервуаре.

Как велика должна быть степень осушения атмосферного воздуха видно из следующего примерного расчета.

Пусть температура атмосферного воздуха $t_2 = 20^\circ$, при относительной влажности 70%, так что $W_0 = 0,73 \text{ г/м}^3$; температура воздуха в главном резервуаре $T_1 = 0^\circ$. Давления в главном резервуаре (p_1) и в магистрали (p_2) соответственно равны 9 и 5 ата. Из условия недопущения конденсации в магистрали для влажности воздуха в главном резервуаре W_1 имеем:

$$W_1 < \frac{0,85 \cdot 9 \cdot 1,05 \cdot \left(1 - \frac{20}{273}\right)}{5} > 1,48 \text{ г/м}^3,$$

Насыщение воздуха при 0° составляет $4,89 \text{ г/м}^3$, следовательно должно быть удалено, $4,89 - 1,48 = 3,41 \text{ г}$ воды на 1 м^3 воздуха главного резервуара. 1 куб. м наружного воздуха дает воздуха с состоянием в главном резервуаре:

$$\frac{1}{9 \cdot \left(1 - \frac{20}{273}\right)} = 0,12 \text{ м}^3.$$

Таким образом, 1 м^3 воздуха в главном резервуаре получается из $8,3 \text{ м}^3$ наружного воздуха. Следовательно, на 1 м^3 наружного воздуха нужно удалить влаги: $\frac{3,41}{8,3} 0,41$ или 57% от влаги, содержащейся в воздухе.

Если предположить, что температура воздуха в главном резервуаре $= +10^\circ$, то будем иметь:

$$W_1 \leq \frac{0,85 \cdot 9 \cdot 1,05 \cdot \left(1 - \frac{20}{273}\right)}{5 \cdot \left(1 + \frac{10}{273}\right)} = 1,43 \text{ г/м}^3.$$

На 1 м^3 наружного воздуха придется удалить влаги $9,55 \text{ г}$ или около 77% от влаги, содержащейся в воздухе, чего, вероятно, можно достигнуть даже и при столь низких концентрациях, имея в виду опыты при низкой температуре, а также литературные указания о возможности снижения влажности воздуха при помощи силикагеля до точки росы $= -46^\circ$ ¹⁾. Окончательные суждения об этом можно получить лишь при опытах на тормозной установке.

При установке адсорбера во втором пункте можно руководствоваться следующими соображениями. В главном резервуаре мы имеем всегда насыщенный воздух при той или иной температуре, в зависимости от которой находится количество влаги в воздухе. Выше мы видели, что эта температура должна отличаться от температуры воздуха в магистрали (которая принимается равной температуре наружного воздуха) не более, чем на $3-4^\circ$; если же температура воздуха в главном резервуаре более высокая, то в магистрали будет иметь место конденсация воды. Удаляя избыточную влагу из воздуха главного резервуара, можно иметь относительную влажность воздуха в магистрали не более 85% как это требуется, при более высоких температурах.

Для относительной влажности воздуха в магистрали имеем:

$$Gm = \frac{p_2 \cdot W_1 \cdot (1 + \alpha t_1)}{1_1 \cdot W_2 \cdot (1 - \alpha t_2)} \leq 0,85,$$

где обозначения те же, что на стр. 23. Положим, что $p_1 = 9 \text{ ата}$, $p_2 = 5 \text{ ата}$ и $t_2 = -10^\circ$. Найдем наибольшую температуру воздуха в главном резервуаре, при которой не будет конденсации в магистрали, имея в виду поглощение влаги силикагелем. Пусть это поглощение идет согласно цифр табл. III и первый рабочий цикл (т. е. пропускание через осушитель влажного воздуха) продолжается 4 часа. Из предыдущего выражения, подставляя значения, имеем:

$$W(1 + \alpha t_1) = \frac{0,85 \cdot 9 \cdot 2,31 \cdot \left(1 - \frac{10}{273}\right)}{5}$$

¹⁾ Zeitschr. für deutscher Ingenieur 70,907 (1926).

ИЛИ

$$W_1 (1 + \alpha t_1) = 3,59.$$

Пренебрегая множителем $(1 + at_1)$, в виду его малого значения, имеем:

$$W_1 = 3,59 \text{ г/м}^3.$$

Взяв наименьшее количество удаляемой влаги для 4-го часа: $6,3 \text{ г/м}^3$, найдем, что содержание влаги в воздухе главного резервуара должно быть не больше

$$W^o = 3,59 + 6,3 = 9,89 \text{ г/м}^3,$$

чему отвечает температура более $+10^{\circ}$. Таким образом в данном случае конденсация будет отсутствовать при разности температур воздуха в главном резервуаре и в магистрали $= 10 - (-10) = 20^{\circ}$.

Если ограничиться 3-х часовым периодом работы в первом цикле, то будем иметь:

$$W_0 = 3,59 + 7,2 = 10,79 \text{ z/m}^3,$$

чему соответствует температура около $+12^\circ$ и соответствующая разность составляет 22° .

Для наружной температуры равной, например, -20° аналогичным образом найдем:

при 4 часах работы: $W_0 = 7,79$; $t_1 = +7^\circ$;
 " 3 " " $W_0 = 7,89$; $t_1 = +8,5^\circ$.

Для определения необходимых размеров адсорбера принимаем следующие условия на основании данных опытов в лаборатории:

время контакта τ : 0,5 сек.
высота слоя сорбента: 0,3 м.

1. При установке адсорбера в первом пункте. Производительность тендем насоса $= 1,46 \text{ м}^3/\text{мин}$. Скорость воздуха внутри слоя сорбента (из ур. 1) будет:

$$V = \frac{h}{\tau} = \frac{0,3}{0,5} = 0,6 \text{ м/сек.}$$

Площадь свободного сечения $\omega = \frac{1,46}{60,06} = 0,041 \text{ м}^2$. Весовое количество сорбента (из ур. 2)

$$G = \frac{0.041 \cdot 0.3 \cdot 1000}{0.66} \cong 19 \text{ кг.}$$

Общая площадь адсорбера:

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{19}{600 \cdot 0.3} = 0,106 \text{ м}^2.$$

Диаметр адсорбера:

$$D = \sqrt{\frac{0,106.4}{3,14}} = 0,367 \text{ м.}$$

При наличии насоса „Дуплекс-Компаунд“ МГЗ с производительностью $3,3 \text{ м}^3/\text{мин}$

Весовое количество сорбента = 41 кг
Диаметр адсорбера = 0,538 м.

2. При установке во втором пункте. Скорость воздуха в магистрали во время торможения при диаметре трубы в 1" примем $= 100 \text{ м/сек}$. Линейная скорость воздуха внутри слоя сорбента будет (из уравнения 1):

$$V = \frac{h}{T} = 0,6 \text{ м/сек.}$$

Площадь свободного сечения:

$$\omega = \frac{100.3,14.0,0254^2}{4.0,6} = 0,0844 \text{ м}^2$$

Вес сорбента:

$$G = \frac{0,0844.0,3.100.0}{0,66} = 58 \text{ кг.}$$

Общая площадь адсорбера:

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{38}{600.0,3} = 0,211 \text{ м}^2$$

Диаметр адсорбера:

$$D = \sqrt{\frac{0,211.4}{3,14}} = 0,518 \text{ м.}$$

Предполагаемая конструкция адсорбера (для 2-го случая) состоит из железного цилиндра с конусной частью внизу. При помощи фланцев цилиндр в верхней части соединяется болтами со шлемом. Дырчатое днище которого состоит из перфорированного железного листа с круглыми отверстиями диаметром 3 мм. Суммарная площадь отверстий $= \frac{\omega}{2}$ для создания большей скорости воздуха в отверстиях и соответствующей потери напора на создание этой скорости с целью более равномерного распределения воздуха в слое сорбента. Таким образом, количество отверстий $= \frac{0,0844}{3,14.0,003^2} \cong 2950$. Нижний дырчатый лист имеет ($\varnothing = 3 \text{ мм}$) 5900 отверстий ¹⁾.

Гранулометрический состав силикагеля соответствует прохождению через сито с отверстиями в 1 мм, при отсеве мелочи на сите с 400 отв/см². Для того, чтобы зерна не проваливались в отверстия, на днище и сверху слоя сорбента помещается асбестовая шерсть слоем в 10 мм—6. 7—кольцо для извлечения дырчатых листов при разборке.

Первый цикл работы (на поглощение) может происходить, повидимому, не менее, чем в продолжении 4-х часов (а может быть и больше), после чего следует продувка паром в продолжении 15—20 минут; затем вновь следующий рабочий цикл и т. д.

При возможном загрязнении силикагеля пылью или маслом, через известный промежуток времени может потребоваться активирование сорбента путем нагревания его при температуре 400—500° на особой стационарной установке, что должно быть связано с перезарядкою адсорбера через известные периоды. Как велики эти периоды, можно установить только на практике, но, вероятно, они должны быть значительными, предполагая малую загрязняемость при наличии пылевого фильтра и нахождение адсорбера вдали от компрессора за главным резервуаром.

В лаборатории, при имеющейся обстановке, невозможно было изучать влияния повышенного давления на эффект поглощения влаги (все опыты производились при атмосферном давлении).

Все, что не могло быть выяснено в лаборатории, а равно и проверка полученных результатов и предварительных расчетов, должно быть произведено в практической обстановке. Настоящие же данные можно рассматривать лишь, как первое приближение.

¹⁾ Адсорбер и паропровод к нему, разумеется, должны быть теплоизолированы.