

Оценка влагоемкости силикагеля для обеспечения безопасной эксплуатации пневматических систем

Г.П. Павлихин, д-р техн. наук, профессор

В.А. Львов, ст. преподаватель

О.Г. Калугина, аспирант

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

email: pavlikhin@bmstu.ru

Ключевые слова:

безопасность эксплуатации пневматических систем, промышленная чистота, адсорбционная осушка воздуха, влагоемкость, силикагель.

Проанализированы основные методы определения влагоемкости силикагеля и разработан новый способ ее экспериментальной оценки в эксплуатационных условиях пневматических систем. Раскрыты основы базового способа обеспечения постоянной влажности сжатого воздуха, используемого при проведении оценок влагоемкости силикагеля, и представлено описание стенда для его практической реализации. Описана методика проведения экспериментов при различных модификациях предложенного способа и выполнена оценка погрешности измерений. Представлены экспериментальные результаты оценки влагоемкости мелкопористого силикагеля с помощью разработанного способа в статических условиях и при изменении параметров процесса поглощения, а также проведено их сопоставление с аналогичными данными, полученными другими способами. Проведена статистическая обработка результатов анализов и показано, что насыпная плотность мелкопористого силикагеля может рассматриваться лишь в качестве косвенной и качественной характеристики его влагоемкости, не дает необходимую точность количественных оценок для обеспечения безопасности эксплуатации пневматических систем.

1. Введение

Пневматические системы широко применяются во многих производственных и/или технологических процессах различных отраслей промышленности, энергетики, транспорта и связи [1–4]. Обычно их используют в качестве источников рабочих, технологических и защитных сред, средств автоматизации и/или управления, исполнительных систем и т.п. [1–5], а в отдельных случаях — как средства обеспечения безопасности протекающих процессов [6], включая решение вопросов жизнеобеспечения городов и населенных пунктов [4, 7].

Часто проблемы обеспечения надежной и безопасной работы пневматических систем неразрывно связаны с промышленной чистотой их сред, в частности сжатого воздуха. Согласно ГОСТ Р ИСО 8573–1–2005, чистота сжатого воздуха в настоящее время оценивается по его влажности и содержанию гетерогенных загрязняющих примесей. Аналогичный подход применяется и в ГОСТ 17433–80, что свидетельствует о

сохранении преимущества в вопросе определения лимитирующих загрязняющих примесей воздуха.

Одним из основных путей обеспечения требуемой влажности сжатого воздуха (φ) в пневматических системах является использование адсорбционных методов его осушки с применением пористых промышленных адсорбентов [1–8], в первую очередь технического силикагеля [9]. Несколько сотен организаций занимаются его поставкой по всей России, однако лишь несколько предприятий освоили производство этого адсорбента в промышленных масштабах. В результате потребители относительно небольших объемов силикагеля, к которым относятся подавляющее большинство эксплуатационных служб пневматических систем, вынуждены обращаться к услугам посредников. При этом показатели поставляемого ими технического силикагеля обычно ограничиваются набором технических требований изготовителя по ГОСТ 3956–76, экспериментальная

проверка которых в реальных условиях эксплуатации пневматических систем оказывается крайне затруднительной, особенно в части оценок фактической влагоемкости силикагеля (a). Для проведения подобных оценок в динамических условиях, которые характерны для многих пневматических систем, этой информации оказывается явно недостаточно, поскольку здесь наиболее информативной характеристикой влагоемкости силикагеля выступают его изотермы адсорбции $a = f(\varphi; T)$.

В силу указанных обстоятельств службы эксплуатации и разработчики пневматических систем, не имея объективных количественных оценок влагоемкости применяемого силикагеля, вынуждены либо использовать свой практический опыт, либо применять некоторые «осредненные» данные поставщиков, которые часто носят рекламный характер. Как следствие, имеют место ошибочные действия, которые могут приводить к необоснованным затратам и нарушению технологического цикла работы пневматических систем, а в отдельных случаях – негативно повлиять на надежность и долговечность работы основного оборудования, а также безопасность протекающих процессов. Дело в том, что даже в стандартных статических условиях применительно лишь к одной марке силикагеля, удовлетворяющего требованиям ГОСТ 3956–76, возможен достаточно широкий диапазон изменения показателей его влагоемкости (рис. 1) [1, 8–10]. Если к этому добавить невозможность определить визуальными методами однозначные различия между крупно- и мелкопористым силикагелем, то становится очевидным, что разработку способов экспериментальной оценки влагоемкости силикагеля в эксплуатационных условиях пневматических систем можно отнести к актуальным и практически значимым прикладным задачам обеспечения техносферной безопасности.

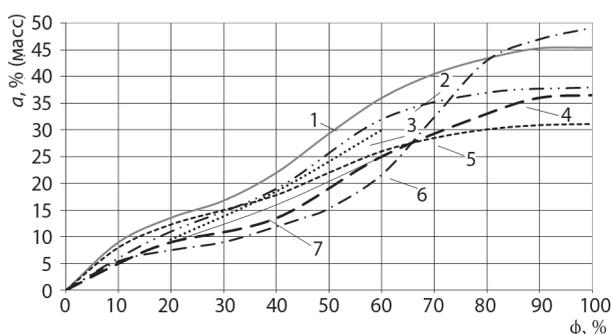


Рис. 1. Изотермы адсорбции H_2O на мелкопористом силикагеле при 20–23°C
1 – Кельцев [9]; 2 – Серпионова [8]; 3 и 4 – ГОСТ 3956-76. Нижние границы силикагеля марки КСМГ высшего и первого сорта, соответственно; 5 – Кельцев [9]; 6 – Глизманенко [1]; 7 – Киселев [10]

2. Анализ основных особенностей экспериментальных методов определения влагоемкости силикагеля

Известно большое число экспериментальных методов определения влагоемкости силикагеля [9–12]. Однако набор технологических операций при их практической реализации неизменно включает этапы исходной регенерации адсорбента и собственно определение его влагоемкости.

Этап исходной регенерации силикагеля может осуществляться как за счет снижения давления адсорбтива, так и путем повышения температуры адсорбента [8–12]. По своей физической сущности это длительный и сложный тепло- и массообменный процесс, скорость которого в основном определяется интенсивностью кинетических процессов десорбции молекул в порах адсорбента и скоростью диффузии влаги из глубины зерна адсорбента в окружающую среду.

Исходная регенерация силикагеля путем снижения давления адсорбтива характерна для прецизионных лабораторных установок и в эксплуатационных условиях пневматических систем практически не используется, прежде всего, из-за необходимости применения дополнительных расходуемых материалов и специального непрофильного оборудования, включая вакуумную технику [9–12]. Поскольку удаление физически адсорбированной влаги из пор силикагеля и восстановление его адсорбционных свойств при нормальном давлении воздуха происходит при нагревании до температуры не более 200 °C [9], в подавляющем большинстве случаев исходную регенерацию силикагеля обычно проводят термическим способом. Указанное обстоятельство позволяет при температуре силикагеля 150–160 °C примерно за 3 часа провести процесс его исходной регенерации в нормальных условиях даже при отсутствии продувки потоком осушенного воздуха. Следует особо подчеркнуть, что во многих эксплуатационных службах пневматических систем сушильные шкафы с данным диапазоном температур относятся к разряду штатного оборудования и уже имеются в наличии. Дальнейшее повышение температуры силикагеля с целью увеличить полноту регенерации и/или сократить длительность этого процесса не дает положительного результата, поскольку приводит к разрушению ОН-групп на поверхности силикагеля и ухудшению его адсорбционных свойств [9].

Технологические приемы на этапе определения влагоемкости силикагеля и их аппаратное оформление весьма разнообразны [9–12]. Условно их можно разделить на две группы. Для первой группы характерна работа исключительно с парами чистого вещества — H_2O , для второй — с газовой смесью, содержащей неконденсирующийся газ и пары H_2O . Обе эти группы входят в состав как динамических, так и

статических методов определения адсорбции газов и паров пористыми твердыми телами [9, 10].

Разновидности динамических методов обычно базируются на основе приемов хроматографии [10, 13], включающих измерение концентрации адсорбтива в потоке несорбирующегося газа-носителя на входе и выходе контрольного объема адсорбента. Поскольку хроматографический анализ достаточно быстротечен и часто занимает всего несколько десятков секунд, он применим только для систем «адсорбтив–адсорбент», в которых имеет место быстрое установление равновесия [9]. К сожалению, во многих практических случаях для системы «Н₂О — силикагель» это условие в полном объеме не выполняется. В результате в эксплуатационных условиях пневматических систем применение динамических методов определения влагоемкости силикагеля в чистом виде не получило широкого распространения, в том числе из-за отсутствия детальной проработки методик проведения измерений и дороговизны их аппаратного оформления.

Применение основных приемов динамических методов определения влагоемкости силикагеля в рассматриваемых условиях следует признать весьма перспективным. В том числе и при практической реализации аналогичных статических методов экспериментального определения влагоемкости силикагеля, особенно после начала серийного выпуска портативных гигрометров относительно невысокой стоимости [14, 15].

При реализации статических методов определения влагоемкости силикагеля его помещают в газовую или паровую атмосферу, после установления равновесия обычно измеряют равновесные давление, температуру и количество поглощенного адсорбтива. Измерения влагоемкости производят или по изменению веса силикагеля (весовой метод) [9,12], или по разности количества адсорбтива, введенного в измерительную ячейку и оставшегося в равновесной газовой фазе после контакта с адсорбентом (объемный метод) [9, 10, 12]. Последний метод обычно применяют для изучения влагоемкости крупнопористых адсорбентов, обладающих малой адсорбционной способностью. Имея высокую разрешающую способность и точность, весовой и объемный методы широко применяются в лабораторной практике при создании прецизионных установок для проведения аналитических исследований физико-химических свойств различных адсорбентов [9–12].

В эксплуатационных условиях пневматических систем классическое лабораторное оформление этих методов требует не только применения уникального оборудования, но и привлечения высококвалифицированных специалистов из других областей знаний [9–12]. Естественно, подобные затраты могут позволить себе лишь отдельные крупные научно-произ-

водственные объединения или научно-исследовательские организации соответствующего профиля.

Более простая разновидность статических методов определения влагоемкости силикагеля — *эксикаторный метод* [9]. Сущность метода состоит в насыщении помещенной в эксикатор навески отрегенированного адсорбента. Заданная концентрация паров воды в эксикаторе обеспечивается либо насыщенными растворами солей, либо серной кислотой различной концентрации. Влагоемкость силикагеля определяется весовым способом по разности массы навески до и после регенерации. Данный метод обычно применяют в заводской практике для контроля качества адсорбентов при их производстве. Причем одна из модификаций аппаратного оформления этого метода заложена в основу контроля влагоемкости силикагеля по ГОСТ 3956–76. В эксплуатационных условиях пневматических систем применение эксикаторного метода сдерживается необходимостью как использовать непрофильное лабораторное оборудование специального назначения и расходимые материалы, так и обучить персонал работе с опасными химикатами.

Представленный материал наглядно показывает, что в чистом виде ни один из рассмотренных методов оценки влагоемкости силикагеля не обеспечивает возможность его эффективного применения в эксплуатационных условиях пневматических систем. В первую очередь из-за специфического набора технологических операций и специального оборудования, обеспечивающих создание, поддержание и контроль постоянной влажности парогазовой среды. Основная задача данной работы — создать на основе применения профильного оборудования пневматических систем такой способ оценки влагоемкости силикагеля, который при достаточно высокой разрешающей способности обеспечивал бы возможность проведения необходимых оценок в относительно широком диапазоне изменения влажности и при минимальном наборе дополнительных средств измерения, выпускаемых серийно.

3. Способ обеспечения постоянной влажности сжатого воздуха и экспериментальный стенд для его реализации

Необходимым условием практической реализации статических методов определения влагоемкости силикагеля является создание и поддержание различных значений постоянной влажности газовой среды на протяжении всего процесса его насыщения влагой. Известно, что при давлении менее 1 МПа наибольшее количество паров Н₂О, которое может содержаться в 1 м³ воздуха, определяется только его температурой и теоретически не зависит от давления. Совокупность способов осушки воздуха, основанных на этой и дру-

гих физических закономерностях, получила название *физических методов осушки воздуха* [1].

Одной из разновидностей физических методов осушки воздуха является способ осушки воздуха, построенный на принципе его сжатия в изотермических условиях $T_0 = const$ с образованием и удалением влаги в виде конденсата, с последующим изотермическим снижением давления и получением воздуха с относительной влажностью менее 100%. Рассматривая сжатый насыщенный влажный воздух как идеальную газовую смесь при абсолютном давлении P_n , можно показать, что относительная влажность воздуха после изотермического снижения абсолютного давления до величины $P_k < P_n$ составит величину:

$$\varphi = P_k/P_n.$$

Поскольку при давлении воздуха $P_n < 1$ МПа парциальное давление насыщения P_{ps} пара отличается от давления насыщения чистого водяного пара P_s менее чем на 1% [16], с точностью, необходимой для проведения инженерных оценок, можно записать:

$$\varphi = P_k/P_n = P_i/P_s = a_i/a_s,$$

где: a_i и a_s — абсолютная влажность воздуха и насыщенного воздуха при температуре T_0 и давлении P_k ; P_i — парциальное давление чистого водяного пара в этих условиях.

В результате можно определить давление насыщения чистого водяного пара P_s не только по экспери-

ментальным данным [9, 17], но и с помощью уравнения, приведенного в [18]:

$$\lg P = -\frac{A}{T} + B \lg T + D, \quad (1)$$

где: P — парциальное давление насыщенных паров в рассматриваемой системе, Па; T — температура рассматриваемой системы, К; $A = 2900$; $B = -4,65$; $D = 24,738$, причем погрешность расчета давления насыщенного пара по уравнению (1) составляет не более $\pm 0,5-2\%$.

Именно этот способ осушки воздуха положен в основу технологических операций и оборудования, обеспечивающих создание и поддержание постоянной влажности воздуха при оценке влагоемкости силикагеля в эксплуатационных условиях пневматических систем. Для практической реализации технологических операций, обеспечивающих создание и поддержание постоянной влажности воздуха при насыщении силикагеля, создан экспериментальный стенд, принципиальная схема которого представлена на рис. 2.

Стенд работает следующим образом: атмосферный воздух из рабочего помещения через фильтр 1 поступает в компрессор 2 и после сжатия, охлаждаясь в теплообменном аппарате 3, через обратный клапан 4 направляется в ресивер 5, оснащенный вентилями 6 и 7, где происходит накопление и предварительная очистка и осушка сжатого воздуха от кон-

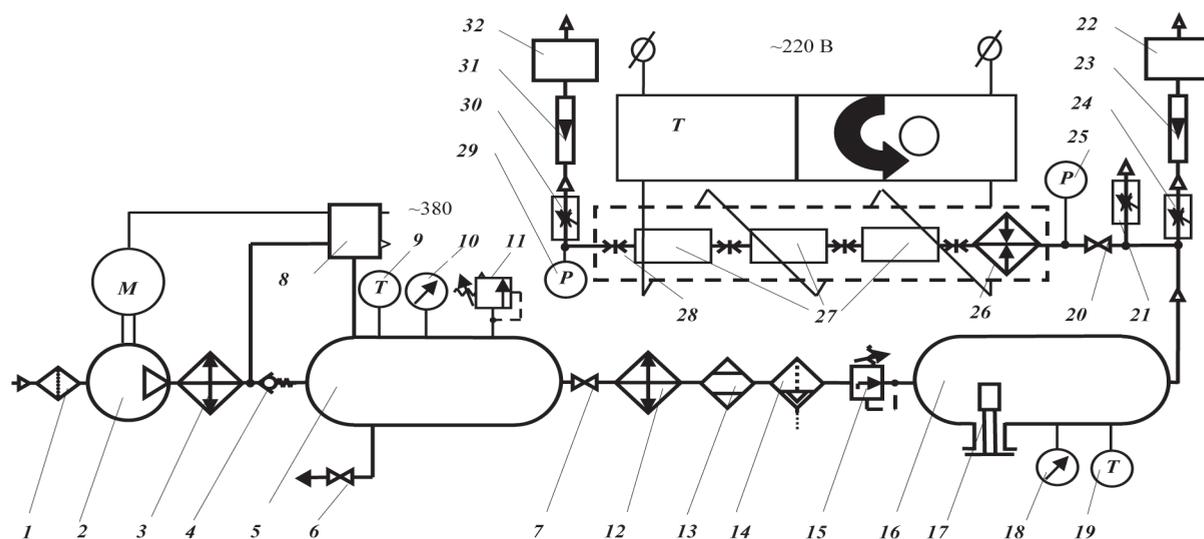


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда:

1 — фильтр; 2 — компрессор; 3, 12 и 26 — аппарат теплообменный; 4 — клапан обратный; 5 — ресивер; 6, 7 и 20 — вентили; 8 — прессостат; 9, 19 — датчики температуры; 10, 18 — манометры; 11 — клапан предохранительный; 13 — угольный фильтр-адсорбер; 14 — фильтр-влагоотделитель; 15 — клапан редукционный; 16 — усреднитель; 17 — патрубок для установки контрольных образцов; 21, 24 и 30 — вентили дроссельные; 22, 32 — гигрометры; 23, 31 — расходомеры постоянного перепада давления; 25, 29 — микроманометры спиртовые с наклонной трубкой; 27 — участок рабочий; 28 — термостат

денсированной фазы загрязняющих примесей. После достижения давления, предварительно установленного на прессостате 8, который позволяет запускать и останавливать компрессор 2 при заданной величине давления в ресивере 5, происходит остановка компрессора 2. Причем встроенный разгрузочный клапан прессостата 8 открывается и обратный клапан 4 закрывается, что приводит к снижению давления в нагнетательной магистрали компрессора 2 и в теплообменном аппарате 3, обеспечивая готовность компрессора 2 к повторному запуску.

Удаление излишков конденсированной фазы загрязнений из ресивера 5 производится через вентиль 6. Контроль температуры и давления в ресивере 5 осуществляется с помощью датчика температуры 9 и манометра 10. Безопасность протекающих процессов обеспечивается с помощью предохранительного клапана 11 и встроенного теплового реле прессостата 8.

Из ресивера 5 через открытый вентиль 7 влажный, насыщенный воздух с остатками конденсированной фазы загрязняющих примесей поступает в теплообменный аппарата 12, далее проходит через угольный фильтр-адсорбер 13 и фильтр-влагоотделитель 14, образующие блок подготовки воздуха, в котором происходит окончательная очистка сжатого, влажного, насыщенного воздуха от углеводородов, следов компрессорного масла и продуктов его разложения, а также капельной влаги. При этом фильтр-влагоотделитель 14 может выполнять функции дополнительного увлажнителя воздуха. После прохождения редукционного клапана 15 влажный насыщенный воздух с постоянной относительной влажностью $\varphi < 100\%$ поступает в усреднитель 16, оснащенный патрубком 17 для установки контрольных образцов. Давление и температура в усреднителе контролируются манометром 18 и датчиком температуры 19.

Постоянное давление в усреднителе 16 устанавливается с помощью редукционного клапана 15, вентиля 20 и дроссельного вентиля 21 по показаниям манометра 18. Постоянство влажности и температуры воздуха на выходе из усреднителя 16 контролируется гигрометром 22, расход воздуха через который определяется расходомером 23 и регулируется дроссельным вентилем 24.

Влажный воздух из усреднителя 16 через вентиль 20, давление на выходе из которого контролируется с помощью микроманометра 25, поступает в теплообменный аппарат 26 и далее в рабочий участок 27, состоящий из нескольких секций, состыкованных быстроразъемными соединениями (рис. 3), который размещен в термостате 28.

На выходе из рабочего участка 27 (рис. 2) давление воздуха измеряется микроманометром 29, а его расход регулируется дроссельным вентилем 30 по по-

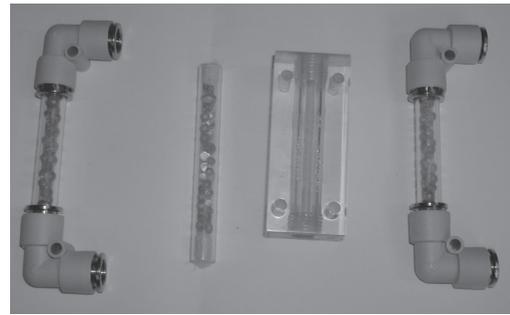


Рис. 3. Секции рабочего участка с быстроразъемными соединениями

казаниям расходомера 31. Влажность и температура воздуха на выходе из рабочего участка определяются с помощью гигрометра 32.

Результаты экспериментального определения средней величины относительной влажности воздуха φ на выходе из усреднителя 16 при 16–27 °С в зависимости от величины отношения давлений P_k/P_n на редукционном клапане 15 при различных вариантах оформления блока подготовки воздуха представлены на рис. 4.

Полученные данные показывают, что независимо от варианта оформления блока подготовки воздуха, относительная влажность воздуха на входе в редукционный клапан изменяется в пределах 90–98%, что позволяет поддерживать постоянную относительную влажность воздуха на выходе из усреднителя с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$. При этом в сжатом воздухе у свободнодисперсных загрязняющих примесей можно констатировать отсутствие агрегативной устойчивости, что делает целесообразным применение в составе экспериментального стенда компрессоров без смазки цилиндров.

Можно сделать вывод, что экспериментально подтверждена возможность применить предложенный способ обеспечения постоянной влажности сжатого воздуха в исследуемом диапазоне изменения давления, даже при отсутствии термостатирования. Вместе с тем контролировать относительную влажность воздуха на выходе из усреднителя 16 (рис. 2) надо обязательно, поскольку предварительная установка требуемого значения влажности воздуха в усреднителе 16 лишь с помощью давления на редукционном клапане 15 не обеспечивает необходимую точность задания этой величины.

Очевидно, что после насыщения влагой предварительно подготовленных контрольных образцов силикагеля в условиях постоянной влажности воздуха $a_i = const$ необходимо провести ряд технологических операций и расчетов для объективной оценки влагоемкости исследуемых образцов. В эксплуатационных условиях пневматических систем это можно сделать на основе весового способа, вне состава экспериментального стенда.

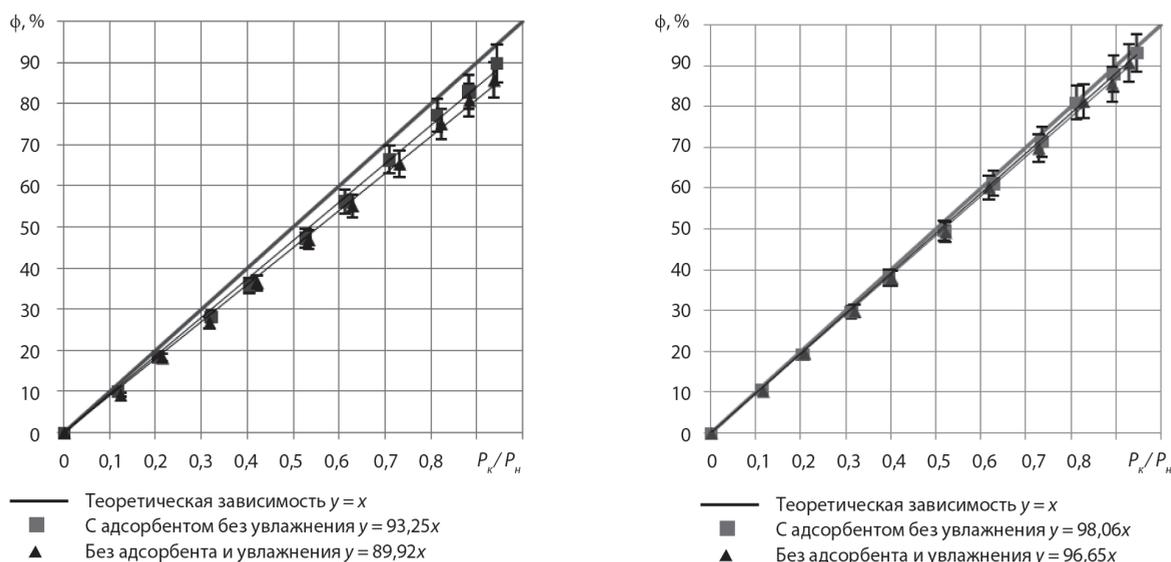


Рис. 4. Средняя относительная влажность воздуха ϕ на выходе из усреднителя

4. Особенность методики оценки влагоемкости силикагеля весовым способом

В прецизионных лабораторных установках, предназначенных для проведения аналитических исследований свойств различных адсорбентов, исходную регенерацию силикагеля и оценку его влагоемкости весовым способом обычно производят непосредственно в составе установок [9–12]. При этом особенностью методики оценки влагоемкости силикагеля весовым способом можно считать необходимость определения малых разностей. Действительно, если m_n и m_k — масса контрольной навески силикагеля после регенерации и после насыщения влагой при $a_i = const$, то величина $\Delta m = m_k - m_n$ характеризует влагоемкость навески. Эта величина определяется путем отдельной оценки величин m_n и m_k , проводимой примерно с одинаковой абсолютной погрешностью δ . В результате определение Δm может иметь абсолютную погрешность 2δ и относительную погрешность $\varepsilon = 2\delta/\Delta m$. Очевидно, что при $\Delta m \rightarrow 0$, $\varepsilon \rightarrow \infty$, в прецизионных установках эта проблема обычно решается путем применения малых навесок силикагеля массой $m \sim 0,05$ г, позволяющих достигнуть примерной соизмеримости величин Δm , m_n и m_k , в сочетании с применением вы-



Рис. 5. Герметизация контрольных навесок в бюксах

сокоточных встроенных весов [9–12], а также за счет приемов рандомизации возникающих ошибок.

Применение аналогичных решений возможно и в эксплуатационных условиях пневматических систем, но здесь необходимо использовать относительно большие навески силикагеля $m \sim 50$ г. Дело в том, что в рассматриваемом способе оценки влагоемкости силикагеля после завершения насыщения влагой контрольной навески в условиях постоянной влажности воздуха $a_i = const$ производят её извлечение из станда с последующей герметизацией либо в бюксах с притертыми крышками (рис. 5), либо непосредственно в секциях рабочего участка (рис. 3). При этом оценку величин m_n и m_k проводят с учетом массы устройства герметизации M , после измерения их суммарной массы M_c , в виде $m = M_c - M$, поэтому необходимо добиться примерной соизмеримости величин Δm , m_n и m_k не только между собой, но и с величиной M .

В результате появляется возможность провести измерения на обычных лабораторных весах, например равноплечных 2-го класса ВЛР-200 г, либо аналогичных весах общего назначения по ГОСТ Р 53228–2008 того же класса точности и пределом взвешивания не более 200 г. При этом цена деления шкалы весов должна быть не более 1 мг, а делительного устройства — не более 0,05 мг. Причем применяемые гири по ГОСТ OIML R 111-1-2009 должны быть не более класса точности E_2 , а результаты взвешивания следует округлять с точностью до четвертого десятичного знака. В этом случае абсолютная погрешность взвешивания не превысит $\pm 1,0$ мг. Необходимо отметить, что подобное лабораторное оборудование, как правило, имеется в организациях, где осуществляется эксплуатация большого количества пневматических систем.

5. Результаты экспериментальной оценки влагоемкости промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ в статических условиях

При проведении экспериментальной оценки влагоемкости промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ в статических условиях на первом этапе исследований, после завершения процесса исходной регенерации, контрольная навеска силикагеля массой $m \approx 50 \cdot 10^{-3}$ кг при температуре $T_n \sim 70$ °С, в перфорированном стакане через патрубок 17 (рис. 2) помещалась в усреднитель 16 экспериментального стенда. После герметизации разъемных соединений и установки требуемого давления на редукционном клапане 15, обеспечивающего минимально возможную влажность воздуха, при закрытом вентиле 20 и открытом вентиле 21 производилась предварительная продувка усреднителя 16 потоком осушенного воздуха при температуре окружающей среды $T_0 = 19-26$ °С с расходом $Q \sim 10$ дм³/мин до момента установления постоянной влажности на выходе из усреднителя 16, которая контролировалась с помощью гигрометра 22. Далее вентиль 21 закрывался и с помощью редукционного клапана 15 устанавливалось требуемое давление в усреднителе 16, после чего он продувался потоком воздуха с расходом $Q \approx 3,0-3,5$ дм³/мин только через гигрометр 22 на протяжении порядка 48 часов. При этом для определения средних показателей протекающих процессов влажность воздуха и его температура регистрировались на протяжении всего процесса продувки. По окончании процесса продувки контрольная навеска силикагеля герметизировалась (рис. 5) и весовым способом производилась оценка ее средней влагоемкости при данной влажности воздуха. После повторной подготовки и регенерации той же контрольной навески силикагеля ее снова помещали в усреднитель 16, изменяли давление на редукционном клапане 15 (рис. 2) и повторяли процессы насыщения и оценки влагоемкости контрольной навески силикагеля тем же способом и в той же последовательности, но уже при другой, более высокой влажности воздуха.

На втором этапе исследований после завершения процесса исходной регенерации контрольная навеска силикагеля массой $m \approx 50 \cdot 10^{-3}$ кг при температуре $T_n \sim 70$ °С помещалась в секции рабочего участка 27 с быстросъемными соединениями (рис. 3), который потом закрепляли в термостате 28 (рис. 2). На редукционном клапане 15 устанавливали требуемое давление, обеспечивающее минимально возможную влажность воздуха. При закрытом вентиле 20 и открытом вентиле 21 производилась предварительная продувка усреднителя 16 потоком осушенного воздуха при температуре окружающей среды $T_0 = 15-22$ °С с расходом $Q \sim 10$ дм³/мин до момента установления постоянной влажности на выходе из усреднителя 16, которая контролировалась

с помощью гигрометра 22. Одновременно с этим производилось термостатирование рабочего участка 27 в рабочем диапазоне средних температур $T_p = 16-40$ °С с абсолютной погрешностью не более $\pm 0,5$ °С.

Далее вентиль 20 закрывали, а вентиль 21 открывали и с помощью редукционного клапана 15 устанавливали требуемое давление в усреднителе 16. После этого рабочий участок 27 продувался при постоянной температуре T_p потоком воздуха с расходом $Q \approx 3,0-3,5$ дм³/мин через гигрометр 32, до момента достижения одинаковой влажности воздуха на входе и выходе из рабочего участка 27, на протяжении порядка 24 часов. Затем при закрытом вентиле 20 и открытом дроссельном вентиле 21 рабочий участок 27 извлекался из термостата 28, герметизировался и взвешивался с точностью до четвертого десятичного знака.

После этого рабочий участок повторно присоединялся к экспериментальному стенду и помещался в термостат 28, но уже без исходной регенерации контрольной навески силикагеля. Затем с помощью редукционного клапана 15 влажность воздуха в усреднителе 16 увеличивали и технологические операции повторяли в той же последовательности. При этом время насыщения контрольной навески сокращали примерно до 8 часов. Результаты экспериментальной оценки средней влагоемкости образца промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ в статических условиях представлены на рис. 6, а для сравнения даны результаты определения средней влагоемкости силикагеля той же контрольной навески, полученные весовым способом в составе прецизионной лабораторной установки.

Сопоставление представленных на рис. 6 результатов позволяет оценить величину относительной погрешности первой и второй модификаций предлагаемого способа на уровне не выше 6% и 7% соответственно. При этом обе модификации предлагаемого способа экспериментальной оценки влагоемкости силикагеля следует признать практически равнозначными.

Статистическая оценка показала, что несмотря на более высокую точность прецизионного лабораторного способа по сравнению с модификациями предлагаемого способа, различия их средних значений влагоемкости находятся в пределах погрешности анализов, что для практики инженерных расчетов позволяет считать представленные результаты экспериментальной оценки средней влагоемкости промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ в статических условиях равнозначными.

Однако из-за существенного сокращения временных затрат применение второй модификации способа оценки средней влагоемкости силикагеля — с продувкой контрольной навески — в эксплуатационных условиях пневматических систем следует признать более предпочтительным. По этой причине последу-

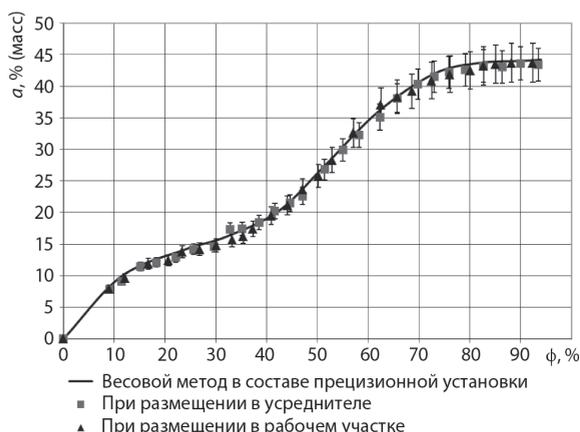


Рис. 6. Средняя влагоемкость образца промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ в статических условиях

ющие исследования проводились в рамках именно этой модификации предлагаемого способа.

6. Результаты экспериментальной оценки влагоемкости промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ при изменении параметров процесса поглощения

В эксплуатационных условиях пневматических систем главными параметрами процесса поглощения влаги можно считать температуру и давление воздуха, а также величину насыпной плотности силикагеля [1–4, 7–14]. Результаты оценки средней влагоемкости образца промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ в статических условиях при изменении средней температуры воздуха в диапазоне 16,3–40,2°C представлены на рис. 7.

В исследованном диапазоне изменения температуры представленные на рис. 7 результаты подтверждают сделанное ранее в [9] заключение о том, что при постоянной относительной влажности газа влагоемкость мелкопористого силикагеля приблизительно постоянна вне зависимости от температуры, при которой происходит процесс поглощения.

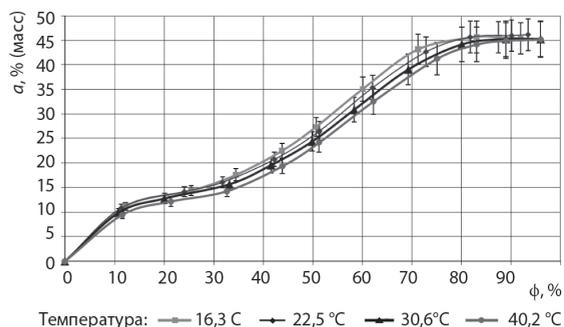


Рис. 7. Средняя влагоемкость образца промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ в статических условиях при различной температуре

Кроме того, они позволяют сделать вывод, что при отсутствии термостатирования относительная погрешность оценок средней влагоемкости силикагеля предложенным способом не превышает 10%.

Для оценки влияния величины давления воздуха на процесс поглощения влаги силикагелем была произведена модернизация пневматической схемы экспериментального стенда (рис. 2): микроманометры 25 и 29 заменены соответствующими образцовыми манометрами и применены в качестве секций рабочего участка 27 элементы повышенной прочности (рис. 3). Результаты оценки средней влагоемкости образца промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ в статических условиях при изменении абсолютного давления воздуха в диапазоне 0,1–0,6 МПа представлены на рис. 8. В исследованном диапазоне давления представленные на рис. 8 результаты позволяют констатировать, что при экспериментальной оценке средней влагоемкости силикагеля определяющей выступает именно величина отношения давления P_k/P_n на редукционном клапане стенда, а не сами величины этого давления.

Для оценки влагоемкости силикагеля в динамических условиях его работы обычно используются значения насыпной плотности силикагеля — ρ_n [9, 19]. При этом в качестве исходных величин проводимых расчетных оценок используются значения координат $(\varphi_n; a_n)$ в точке перегиба на изотерме адсорбции паров воды на силикагеле $a = f(\varphi)$. Для мелкопористых силикагелей эта точка, как правило, находится в диапазоне относительной влажности воздуха $\varphi = 20\text{--}30\%$ [9].

Очевидно, что в случае однозначной взаимосвязи между величинами влагоемкости силикагеля в точке перегиба изотермы адсорбции и его насыпной плотности, т.е. $a_n = f(\rho_n)$, процедура оценки качества силикагеля в эксплуатационных условиях пневматических систем существенно упростилась бы. С этой целью была выполнена серия экспериментов, направленных на выявление подобной зависимости путем исследования проб из различных партий мелкопористого силикагеля марки КСМГ нескольких производителей. При

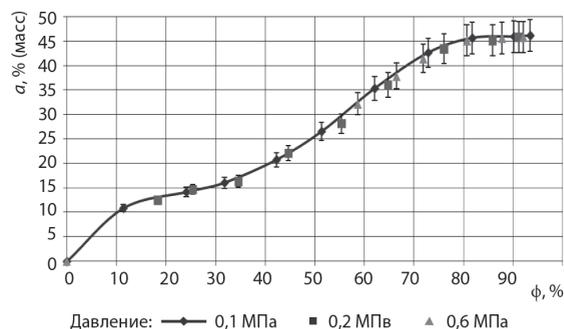


Рис. 8. Средняя влагоемкость промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ в статических условиях при различном давлении воздуха

этом величина насыпной плотности силикагеля в пробах определялась согласно ГОСТ 16190–70, а величина влагоемкости силикагеля в точке перегиба изотермы адсорбции — с помощью разработанного способа. Результаты этих исследований представлены на рис. 9.

Полученные результаты позволяют отметить наличие взаимосвязи между величиной влагоемкости мелкопористого силикагеля в точке перегиба изотермы адсорбции и его насыпной плотности. Однако эта взаимосвязь, выступая в качестве стохастической, не однозначна, поскольку имеет настолько низкий коэффициент парной корреляции (менее 0,86), что для получения количественных оценок даже основной метод регрессионного анализа — метод наименьших квадратов — оказывается не эффективным. При этом относительная погрешность проведения оценок влагоемкости силикагеля может превышать 25%.

В результате можно сделать вывод, что насыпная плотность мелкопористого силикагеля может рассматриваться лишь в качестве косвенной и качественной характеристики его влагоемкости, не позволяющей обеспечить необходимую точность количественных оценок для обеспечения безопасности эксплуатации пневматических систем.

7. Основные результаты работы

1. Разработан способ экспериментальной оценки влагоемкости мелкопористого силикагеля и пока-

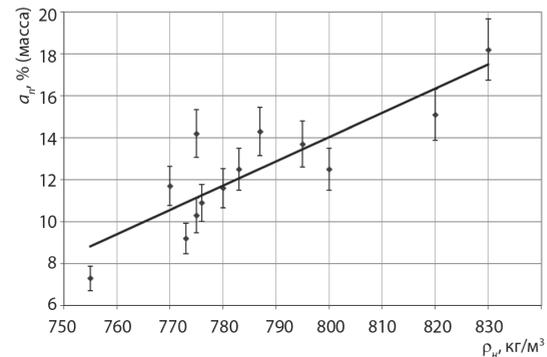


Рис. 9. Взаимосвязь между величиной средней влагоемкости мелкопористого силикагеля в точке перегиба изотермы адсорбции и его насыпной плотности

- зана возможность его реализации в эксплуатационных условиях пневматических систем.
2. С помощью разработанного способа получены экспериментальные результаты оценки влагоемкости образцов промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ в статических условиях и при изменении параметров процесса поглощения.
3. Проведено сопоставление количественных данных влагоемкости промышленного мелкопористого силикагеля марки КСМГ, полученных с помощью разработанного способа, с аналогичными данными, определенными другими способами, и выполнена оценка погрешности результатов измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глизманенко Д.Л. Получение кислорода. — М.: Химия, 1972.
2. Кузьменко Н.М., Афанасьев Ю.М., Катаев М.П., Бабкин М.В. Установка осушки воздуха для консервации теплоэнергетического оборудования // Экология и промышленность России. — 2005. Ноябрь. — С. 10–12.
3. Риполь-Сарагоси Л.Ф. Осушка сжатого воздуха в пневмомагистралях УЗОТ ПТО вагонных депо // Вестник РГУПС. — 2008. № 1. — С. 18–22.
4. Руководство по содержанию кабельных линий городских телефонных сетей под избыточным воздушным давлением. — М.: Радио и связь, 1982.
5. Сырыцын Т.А. Надежность гидро- и пневмопривода. — М.: Машиностроение, 1981.
6. ГОСТ ИЕС 60079–2–2011. Взрывоопасные среды. Оборудование с видом взрывозащиты заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением «р». — М.: Стандартинформ, 2014.
7. Jack Price. It's raining in our cables // Outside Plant. June. — 1998. — P. 44–47.
8. Серпионова Е.Н. Промышленная адсорбция газов и паров. — М.: Высшая школа, 1969.
9. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. — М.: Химия, 1984.
10. Киселев А.В., Древинг В.П. Экспериментальные методы в адсорбции и молекулярной хроматографии. — М.: Издательство Московского Университета, 1973.
11. Дубинин М.М. Физико-химические основы сорбционной техники. — Л.: ГХТИ, 1932.
12. Greg S.G., Sing K.S.W. Adsorption, surface area and porosity. London: Academic Press, 1967.
13. Рачинский В.В. Введение в общую теорию динамики сорбции и хроматографии. — М.: Наука, 1964.
14. Байбаков Ф.Б., Шарпов В.М. Контроль примесей в сжатых газах. — М.: Химия, 1989.
15. Гигрометры ИВГ-1. www.pnc.ru.
16. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. Теоретические основы и технические приложения. — М.: Мир, 1977.
17. Богданов С.Н., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Свойства веществ. — Л.: Машиностроение, 1976.
18. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Физико-химические свойства молекулярных неорганических соединений. — Л.: Химия, 1987.
19. Павлихин Г.П., Львов В.А., Калугина О.Г. Вероятностно-статистическая модель процесса осушки воздуха в установках для содержания оболочек под избыточным давлением // Безопасность в техносфере. — 2012. № 6. — С. 20–27.

REFERENCES

1. Glizmanenko D.L. *Poluchenie kisloroda* [Preparation of oxygen]. Moscow, Himija Publ., 1972. 752 p.
2. Kuz'menko N.M., Afanas'ev M.P., Kataev M.P., Babkin M.V. Installation of air drying for the preservation of thermal power equipment. *Jekologija i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2005, I. November, pp. 10–12. (in Russian)
3. Ripol'-Saragosi L.F. Drying compressed air in UZOT PTO air-pressure line of car shed. *Vestnik RGUPS* [Vestnik RGUPS], 2008, I. 1, pp. 18–22. (in Russian)
4. Instruction of content of cable lines of urban telephone networks under excessive air pressure. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 72 p. (in Russian)
5. Syrytsyn T.A. *Nadezhnost' gidro- i pnevmoprivoda* [Reliability of hydraulic and pneumatic actuator]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 216 p.
6. State Standard IEC 60079–2:2007. Explosive atmospheres - Part 2: Equipment protection by pressurized enclosure «p». Moscow, Standartinform Publ., 2010. 42 p. (in Russian)
7. Jack P. It's raining in our cables. *Outside Plant*, 1998, no. June, pp. 44–47.
8. Serpionova E.N. *Promyshlennaya adsorbtsiya gazov i parov* [Industrial adsorption of gases and vapors]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1969. 414 p.
9. Kel'tsev N. V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Fundamentals of adsorption technology]. Moscow, Himija Publ., 1984. 512 p.
10. Kiselev A.V., Dreving V.P. *Eksperimental'nye metody v adsorbtsii i molekulyarnoy khromatografii* [Experimental methods in molecular adsorption and chromatography]. Moscow, Moscow University Publ., 1973. 448 p.
11. Dubinin M. M. *Fiziko-khimicheskie osnovy sorbtsionnoy tekhniki* [Physico-chemical basis of the sorption technology]. Leningrad, GKhTI Publ., 1932. 381 p.
12. Greg S.G., Sing K.S.W. Adsorption, surface area and porosity. London, Academic Press, 1967. 408p.
13. Rachinskiy V.V. *Vvedenie v obshchuyu teoriyu dinamiki sorbtsii i khromatografii* [Introduction to general theory of sorption dynamics and chromatography]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 137 p.
14. Baybakov F.B., Sharapov V.M. *Kontrol' primesey v szhatykh gazakh* [Control of impurities in the compressed gases]. Moscow, Himija Publ., 1989. 160 p.
15. *Gigrometry IVG-1* [Hygrometers IVG-1] Available at: <http://www.pnc.ru> (Accessed 7 October 2014).
16. Ber G.D. *Tekhnicheskaya termodinamika. Teoreticheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya* [Technical Thermodynamics. Theoretical basis and technical applications]. Moscow, Mir Publ., 1977. 519 p.
17. Bogdanov S.N., Ivanov O.P., Kupriyanova A.V. *Kholodil'naya tekhnika. Svoystva veshchestv* [Refrigeration equipment. Properties of substances]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 168 p.
18. Morachevskiy A.G., Sladkov I.B. *Fiziko-khimicheskie svoystva molekulyarnykh neorganicheskikh soedineniy* [Physico-chemical properties of molecular inorganic compounds]. Leningrad, Himija Publ., 1987. 192 p.
19. Pavlikhin G.P., Lvov V.A., Kalugina O.G. Probabilistic and statistical model of air-drying process in devices for the maintenance of shells under overload pressure. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere], 2012, no. 6, pp. 20–27. DOI: 10.12737/154 (in Russian)

Evaluation of Silica Gel Water Capacity for Pneumatic Systems' Safe Operation Assurance

G.P. Pavlikhin, Doctor of Engineering, Professor, Bauman Moscow State Technical University

V.A. Lvov, Senior Lecturer, Bauman Moscow State Technical University

O.G. Kalugina, Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University

An analysis of main methods for silica gel water capacity determining has been presented. A new method of silica gel water capacity's experimental evaluation in pneumatic systems' operating conditions has been developed. Bases of fundamental method for constant humidity assurance of compressed air used for silica gel water capacity evaluations have been revealed. A description of a test bench for this fundamental method practical realization has been presented. A technique for experimentation with proposed method's different modifications has been described. Measurement error estimation has been performed. Experimental results of finely porous silica gel water capacity evaluation in static conditions and in absorption process's different parameters while using this method have been presented. These results' correlation between similar data obtained by other methods has been carried out. Analyses results' statistical processing has been carried out and it has been shown that a packed density of finely porous silica gel can be considered only as the indirect and qualitative characteristic of its water capacity which isn't allowing to provide the necessary accuracy of quantitative estimates for pneumatic systems' operation safety assurance.

Keywords: pneumatic systems' operation safety, industrial purity, adsorption air-drying, water capacity, silica gel.