Опыт применения

От партнеров программы Natural Gas STAR

REPLACING GLYCOL DEHYDRATORS WITH DESICCANT DEHYDRATORS

ЗАМЕНА ГЛИКОЛЕВОГО ОСУШИТЕЛЯ СИККАТИВНЫМ

Аннотация

В США около 30 000 газовых скважин высокого давления производят 4 трилл. фут.^{3} (112 млрд. м^3) природного газа в год. Около 700 из этих скважин используют обычные гликолевые осушители, выбрасывающие в атмосферу около 1 млрд. фут.^{3} (28 млн. м^3) метана в год. Гликолевые осушители выбрасывают в атмосферу метан, летучие органические соединения (ЛОС) и опасные атмосферные загрязнители (ОАЗ) через гликолевый десорбер, кроме того происходит утечка газа через устройства пневматического управления. Таким образом, происходит потеря газа, увеличиваются затраты и загрязнение окружающей среды.

Партнеры программы Natural Gas STAR обнаружили, что замена гликолевого осушителя на сиккативный сокращает эмиссию метана, ЛОС и ОАЗ на 99%, а также снижает расходы на эксплуатацию и обслуживание. В сиккативном осушителе влажный газ проходит через осушающий слой, состоящий из сиккативных гранул. Таблетки поглощают влагу и постепенно растворяются. Таким образом, эмиссия газа происходит только при открытом осушителе, например, когда добавляют новые гранулы.

Экономический анализ показывает, что замена гликолевого осушителя производительностью 1 млн. фут.^{3}/день (28 тыс. м^3/день) на сиккативный, может обеспечить экономию в размере до $4 403 в год за счет уменьшения объемов потребления топливного газа, выбросов газа, снижения затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также сокращение эмиссии метана на 564 млн. фут.^{3}/год (15,8 тыс. м^3/год).

Данный отчет посвящен тому, как партнеры могут определять области применения сиккативных осушителей и оценить получение экономических и экологических выгод.

Метод сокращения утечки газа[1]	Среднегодовое сокращение эмиссии метана, тыс.фут.^{3} (тыс. м^3)[2]	Среднего-довая экономия газа, тыс.фут.^{3} (тыс. м^3)[3]	Стоимость сэкономлен-ного газа, $[4]	Капиталь-ные затраты, включая установку, $[5]	Стоимость техничес-кого обслужива-ния, $[6]	Срок окупаемости, лет
Замена глико-левой осушки на сиккативную	564 (15,8)	1 063 (29,8)	3 189	12 750	(1 214)	2,9

[1] При условии, что осушитель производительностью 1 млн. фут.^{3}/день (28 тыс. м^3/день) работает при давлении 450 фунтов на кв. дюйм (3,1 МПа) и температуре 47°F (8,33°C).
[2] Разница в утечке метана при гликолевом и сиккативном способе осушки.
[3] Сумма сокращения эмиссии газа и экономия топливного газа.
[4] При цене газа $3/тыс. фут.^{3} ($106/тыс. м^3).
[5] Стоимость установки сиккативного осушителя без стоимости дополнительного оборудования, необходимого для замены гликолевого осушителя.
[6] Разница в стоимости технического обслуживания гликолевого и сиккативного осушителей.

Настоящий документ - один из отчетов серии "Опыт применения", разработанной EPA в сотрудничестве с газовой отраслью в рамках проектов программы Natural Gas STAR.

Описание технологии

Добываемый газ в норме содержит воду. Если не удалять воду, она может конденсироваться и/или замерзать в коллекторных, транспортных и распределительных трубах, провоцируя закупоривание, нарастание давления и коррозию. Во избежание этих проблем добытый газ обычно пропускают через осушитель, где он контактирует с абсорбентом, таким как триэтиленгликоль (ТЭГ), диэтиленгликоль (ДЭГ) или пропиленкарбонат. В самом распространенном случае, при гликолевой осушке, ТЭГ поглощает воду вместе с метаном, ЛОС и ОАЗ. Поглощенная вода и углеводороды затем выпариваются в десорбере и выбрасываются в атмосферу. (См. отчет: *"Optimize glycol curculation and install flash tank separators in glycol dehydrators" /"Оптимизация циркуляции гликоля и применение сепараторов-расширителей при гликолевой дегидратации"*).

Партнеры Natural Gas STAR сообщают об успешном применении альтернативного метода осушки газа - сиккативными осушителями. В таких установках осушки используются гигроскопичные соли для удаления воды из газа. При этом не происходит больших выбросов метана, ЛОС и ОАЗ.

Сиккативы

Гигроскопичные соли, такие как хлориды кальция, калия, лития, используются в нефтегазовой отрасли для дегидратации нефтепродуктов уже более 70 лет. Эти соли притягивают и впитывают воду, постепенно превращаясь в насыщенный солевой раствор. Количество влаги, поглощаемой из углеводородного газа, зависит от типа сиккатива, а также от давления и температуры газа. Хлорид кальция, наиболее используемый и дешевый сиккатив, может обеспечить содержание влаги, пригодное для трубопроводов, при температурах ниже 59°F (15°C) и давлении более 250 фунтов на кв. дюйм (1,7 МПа). Хлорид лития, более дорогой сиккатив, имеет большую область применения: до 70°F (21,11°C) и более 100 фунтов на кв. дюйм (0,7 МПа). В Приложении А приводятся данные равновесного содержания влаги в природном газе, осушенном легкодоступными хлоридами кальция и лития.

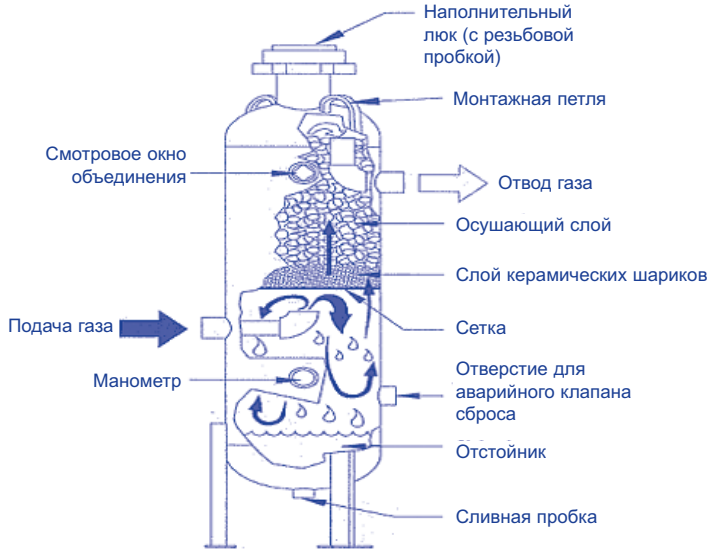
Описание процесса

Сиккативный осушитель - очень простое устройство. Оно не содержит движущихся частей и не требует внешнего питания, что делает его идеальным для удаленных объектов.

Как показано на рис. 1, газ подается снизу в емкость десорбера, под сеткой. Сетка и слой керамических шариков предотвращают проваливание гранул сиккатива в отстойник. Влажный газ поднимается вверх через осушающий слой. При соприкосновении с гранулами сиккатив поглощает водяной пар из газа. По мере поглощения воды сиккатив становится жидким и стекает в отстойник на дне емкости. По мере образования насыщенного раствора сиккатив постепенно убывает.

Раствор, накапливающийся в отстойнике, периодически отводится в накопительный резервуар или (если есть возможность) в испаритель. Полученные вода и раствор могут закачиваться в глубокие скважины на месте либо периодически вывозиться для захоронения в других местах.

Рис. 1: Схема резервуара сиккативного осушителя



Источник: Van Air

При достаточной толщине осушающего слоя содержание влаги в газе и в сиккативе достигает равновесия до того, как газ достигнет верха осушающего слоя.

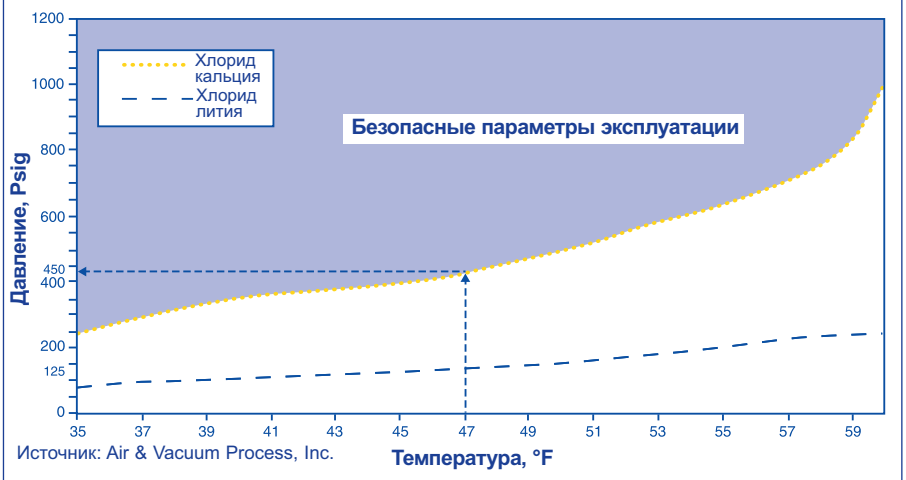
Слой соли выше уровня, достаточного для достижения равновесного содержания влаги, называется "рабочим слоем соли". Этот рабочий материал периодически пополняется. Во избежание прекращения процесса добычи или попадания влажного газа в транспортный трубопровод в процессе пополнения рабочего слоя, большинство установок имеют по два осушителя: пока один работает, другой наполняется солью.

Параметры эксплуатации

Для защиты трубопроводов производители осушают газ до нужных параметров при температуре ниже ожидаемого минимума в трубопроводе. Если газ не осушить надлежащим образом, вода и другие жидкости могут конденсироваться по мере охлаждения газа, что приводит к закупорке труб и коррозии. Чтобы избежать этого, производители, как правило, осушают газ до значений влажности, соответствующих спецификации трубопровода, от 4 до 7 фунтов на млн. фут.^{3} (64 - 112 кг/млн. м^3). Кривые эффективности сиккатива показывают соотношения температуры и давления, при которых влажность газа будет соответствовать стандартам влажности трубопровода. На рис. 2, с использованием данных таблицы содержания влаги из Приложения А, представлены комбинации температуры и влажности, при которых влажность газа составит 7 фунтов на млн. фут.^{3} (112 кг/млн. м^3) при использовании двух наиболее популярных сиккативов. Заштрихованная область выше кривой насыщения на рис. 2 представляет "безопасные параметры эксплуатации" хлоридно-кальциевого осушителя, при которых значение влажности газа будет равно или меньше значения, предусмотренного стандартом. Производители используют эти кривые для определения минимального давления газа, необходимого для обеспечения нужной влажности. В данном случае подаваемый в хлоридно-кальциевый осушитель газ при температуре 47°F (8,33°C) должен быть сжат по меньшей мере до 450

фунтов на кв. дюйм (3,1 МПа), чтобы соответствовать стандарту 7 фунтов воды на млн. фут.^{3} (112 кг/млн. м^3). На рисунке приведены кривые, как для хлорида кальция, так и лития, хотя хлорид лития используется редко из-за высокой стоимости.

Рис. 2: Кривые эффективности сиккатива при максимально приемлемой влажности в трубопроводе (7 фунтов воды на млн. фут.^{3} (112 кг/млн. м^3))



Источник: Air & Vacuum Process, Inc.

Пополнение сиккатива и слив раствора

По мере того, как гранулы сиккатива поглощают влагу из газа, высота осушающего слоя постепенно уменьшается. Некоторые производители помещают "окошко" (смотровое стекло) на стенке осушителя (рис.1) на уровне допустимого минимума сиккатива. Когда поверхность сиккатива становится видна в окошке, оператор должен досыпать сиккатива до максимального уровня. Пополнение рабочего слоя - ручная операция, включающая в себя следующие действия: переключение потока газа на другой осушитель, перекрытие клапанов, чтобы изолировать "пустой" осушитель, выравнивание давления газа с атмосферным, открытие наполнительного люка и засыпку гранул сиккатива. Это требует от оператора загрузки одного или более 30-50 фунтовых (13,6-22,6 кг) мешков соли, в зависимости от конструкции осушителя. Поскольку эту процедуру приходится выполнять тем чаще, чем выше производительность установки, сиккативные осушители, как правило, применяются в случаях, когда объем осушаемого газа не превышает 5 млн. фут.^{3}/сут. (140 тыс. м^3/сут.).

Раствор из отстойника иногда сливается вручную (сиккативные осушители обычно накапливают от 10 до 50 галлонов (от 37,85 до 189,25 литров) раствора в неделю). Перед сливом в испарительную емкость, рекомендуется выровнять давление, а откачку жидкости в резервуар удобнее производить при высоком давлении. В редких случаях раствор откачивают в автоцистерну с помощью пневматической помпы.

Экономические и экологические выгоды

Использование сиккативных осушителей вместо гликолевых дает существенные экономические и экологические выгоды, включая:

★ **Уменьшение капитальных вложений.** Стоимость капитальных затрат на сиккативный осушитель ниже, чем на гликолевый. В сиккативном осушителе не используются промывочный насос, пневматическое управление, газовый нагреватель или ребойлер/регенератор с горелкой.

★ **Снижение стоимости эксплуатации и обслуживания.** Гликолевый осушитель потребляет значительное количество добытого газа в качестве топлива для газового нагревателя и гликолевого регенератора. Если клапан слива раствора автоматический, то единственные затраты на техническое обслуживание сиккативного осушителя включают пополнение рабочего слоя.

★ **Минимальную эмиссию метана, ЛОС и ОАЗ.** Гликолевые осушители постоянно выбрасывают газ в атмосферу через устройства пневматического управления и через вентиляцию регенератора. Эмиссия из сиккативного осушителя происходит только во время снятия давления в резервуаре для пополнения сиккатива, обычно один объем резервуара в неделю. Раствор продуцируется в небольших количествах и поглощает мало углеводородов.

Принятие решения

Партнеры могут оценить целесообразность и экономический эффект замены гликолевой осушки на сиккативную в следующей последовательности.

Пять этапов оценки целесообразности использования сиккативного осушителя:

1. Выбор установок, для которых замена целесообразна
2. Определение мощности осушителя
3. Оценка капитальных и операционных затрат
4. Оценка экономии
5. Экономический анализ

Этап 1: Выбор установок, для которых замена целесообразна. Сиккативные осушители экономически выгодны при определенных условиях эксплуатации. Целесообразность применения определяется в первую очередь объемом добываемого газа, его температурой и давлением. Сиккативные осушители наиболее эффективны, если объем осушаемого газа не превышает 5 млн. фут.^{3} (140 тыс. м^3) в сутки. Они осушают газ до нужных параметров при низкой температуре и высоком давлении. Если температура подаваемого газа слишком высока, сиккатив может образовывать гидроксиды, которые выпадают в осадок, вызывая спекание и проблемы со сливом раствора. В этом случае, чтобы использовать сиккативный осушитель, можно остудить и сжать подаваемый газ, но такие меры усложняют систему и обычно слишком дороги.

Напротив, для более производительных скважин лучше подходят гликолевые осушители, к тому же они лучше работают при высоких температурах при любом давлении. Однако, если температура подаваемого газа слишком низка для гликолевого процесса, оператор будет вынужден нагревать газ перед подачей на осушку. Поскольку нагревание газа потребует дополнительное сжигание газа, на таких скважинах может рассматриваться установка сиккативных осушителей. Рис. 3 иллюстрирует, при каких условиях какие осушители работают лучше.

Рис. 3: Оптимальные рабочие условия для разных методов осушки		
	Низкое давление <100 фунтов на дюйм² (0,7 МПа)	**Высокое давление >100 фунтов на дюйм² (0,7 МПа)**
Низкие температуры <70°F (<21,1°C)	Сиккатив/гликоль1	Сиккатив
Высокие температуры >70°F (>21,1°C)	Гликоль	Гликоль/сиккатив1

[1] Возможно, потребуется нагрев газа, чтобы использовать гликолевый осушитель, или повышение давление газа, чтобы использовать сиккативный.
[2] Возможно, потребуется охлаждение газа, чтобы использовать сиккативную осушку.

Этап 2: Определение мощности осушителя. Чтобы оценить требуемый размер сиккативного осушителя, нужно знать влажность газа на входе и на выходе. Это необходимо, чтобы вычислить нужное количество сиккатива, а затем и размер осушителя. Для оценки содержания воды в газе производители используют графики содержания водяного пара в природном газе (см. Приложение B), таблицы содержания влаги или специальные программы, такие, как Hanover Company's Quick Size, которые можно найти на сайте www.hanover-co.com/home/products/index.html. Предположим, мы рассчитываем осушитель для переработки 1 млн. фут.³/сут. (28 тыс. м³/сут.) газа при температуре 47°F (8,33°C) и давлении 450 фунтов на кв. дюйм (3,1 МПа). Для данного сценария, используя разные методы расчета, получим один и тот же результат: поток природного газа содержит 21 фунт воды на млн. фут.³ (336 кг/млн. м³).

Правило производителя
Одна часть сиккатива удаляет из газа 3 части влаги.

Чтобы соблюсти стандарт влажности в трубопроводе 7 фунтов на млн. фут.³ (112 кг/млн. м³), нужно, чтобы хлоридно-кальциевый сиккатив удалил 14 фунтов воды на млн. фут.³ газа (224 кг/млн. м³). Для осушителя мощностью 1 млн. фут.³/сут. (28 тыс. м³/сут), используя правило производителя о том, что одна часть сиккатива удаляет из газа 3 части влаги, получаем расход хлорида кальция 4,7 фунта (2,13 кг) в день. Рис. 4 иллюстрирует вычисления.

Следующий шаг - определение размера осушителя. Производители поставляют резервуары сиккативных осушителей стандартных размеров, которые обычно различаются по внешнему диаметру и максимальной пропускной способности, как показано на рис. 6.

Размеры рабочего слоя рассчитываются для достижения равновесного содержания влаги. У данного производителя глубина рабочего слоя равна 5 дюймам (12,7 см).

Партнеры могут выбрать размер резервуара из таблиц производителя или рассчитать его, используя данные рис. 5. Для вышеприведенного примера с осушителем мощностью 1 млн. фут.³/сут. (28 тыс. м³/сут.), используя данные рис. 5, получаем резервуар с внутренним диаметром 16,2 дюймов (41,2 см), наружным - около 17 дюймов (43,2 см) с толщиной стенки около 3/8 дюйма (1 см). На рис. 6, в колонке 450 фунтов на кв. дюйм (3,1 МПа), выберем значения, равные или большие нужных; в нашем случае 1,344 млн. фут.³/сут. (37,632 тыс. м³/сут.). Проследив эту строку влево, получаем внешний диаметр 20 дюймов (50,8 см).

Рис. 4: Определение дневного расхода сиккатива	
Где:	
D	= Дневной расход сиккатива, фунтов/сут.
F	= Поток газа, млн. фут.^{3}/сут.
I	= Содержание воды на входе, фунтов/млн. фут.^{3}
O	= Содержание воды на выходе, фунтов/млн. фут.^{3}
B	= Соотношение сиккатив - вода, фунтов сиккатива/фунтов воды
Дано:	
F	= 1 млн. фут.^{3}/сут.
I	= 21 фунт/млн. фут.^{3}
O	= 7 фунт/млн. фут.^{3} (требование к содержанию влаги в трубопроводе)
B	= 1 фунт сиккатива/3 фунта воды (правило производителя)
Вычисляем:	
D	= F * (I-O) * B
	= 1 * (21-7) * 1/3
	= 4,7 фунтов (2,1 кг) сиккатива в день

Рис. 5: Определение размера сиккативного осушителя	
Где:	
ID	= Внутренний диаметр резервуара, дюймов
D	= Дневной расход сиккатива, фунтов/сут.
H	= Высота рабочего слоя соли, дюймов
T	= Время до следующего наполнения, сут.
B	= Плотность, фунтов/фут.^{3}
Дано:	
D	= 4,7 фунтов/сут. (рис. 4)
H	= 5 дюймов (правило производителя)
T	= 7 дней (выбор оператора)
B	= 55 фунтов/фут.^{3} (данные производителя)
Вычисляем:	
ID	$= 12 * \sqrt{\frac{4*D*T*12}{H*\Pi*B}}$
	$= 12 * \sqrt{\frac{4*4,7*7*12}{5*\Pi*55}}$
	= 16,2 дюймов (0,4 м)
Выбрать стандартный размер резервуара из таблицы рис. 6:	
• Выберите ближайший размер больший, чем ID =20 дюймов (0,5 м)	

Рис. 6: Стоимость и максимальная производительность (тыс. фут.^{3} (тыс. м^3)/сут.) сиккативных осушителей								
Внешний диаметр, дюймов, м	Стоимость[1,2], $	100 фунтов на кв. дюйм (0,7 МПа)	200 фунтов на кв. дюйм (1,4 МПа)	300 фунтов на кв. дюйм (2,1 МПа)	350 фунтов на кв. дюйм (2,4 МПа)	400 фунтов на кв. дюйм (2,8 МПа)	450 фунтов на кв. дюйм (3,1 МПа)	500 фунтов на кв. дюйм (3,4 МПа)
10 (0,2)	2 850	95 (2,7)	177 (5)	260 (7,4)	301 (8,5)	342 (9,7)	383 (10,8)	424 (12)
12 (0,3)	3 775	132 (3,7)	247 (7)	362 (10,2)	419 (11,8)	476 (13,5)	533 (15,1)	590 (16,7)
16 (0,4)	5 865	214 (6)	400 (11,3)	587 (16,6)	680 (19,2)	773 (21,8)	866 (24,5)	959 (27,1)
20 (0,5)	6 500	311 (8,8)	620 (17,5)	909 (25,7)	1 054 (29,8)	1 199 (34)	1 344 (38)	1 489 (42,1)
24 (0,6)	8 895	481 (13,6)	900 (25,5)	1 319 (37,3)	1 528 (43,3)	1 738 (49,2)	1 948 (55,1)	2 158 (61,1)
30 (0,8)	12 850	760 (21,5)	1 422 (40,3)	2 085 (59)	2 416 (68,4)	2 747 (77,8)	3 078 (87,1)	3 409 (96,5)
36 (0,9)	17 034	1 196 (33,8)	2 230 (63,1)	3 270 (92,6)	3 789 (107,3)	4 308 (122)	4 827 (136,7)	5 346 (151,4)

[1] Стоимость для уровней давления до 500 фунтов на кв. дюйм (3,4 МПа), включая один резервуар с опорами, клапаны, трубы и начальное наполнение гранулами хлорида кальция.
[2] Стоимость осушителя, включая резервуар, опоры, клапаны и трубы.
Источник: Van Air

Этап 3: Оценка капитальных и операционных затрат. Капитальные затраты на сиккативный осушитель с одним резервуаром, пропускной способностью от 0,1 до 5 млн. фут.^{3} (от 32 800 до 140 000 тыс. м^3) в сутки (включая начальное наполнение сиккативом), колеблются от $3 000 до $17 000. Когда необходимая величина резервуара определена (Этап 2), партнеры могут использовать таблицу рис. 6, чтобы определить капитальные затраты на сиккативный осушитель.

Для примера из Этапа 2 капитальные затраты на сиккативный осушитель с одним резервуаром составят $6 500. Затраты на осушитель с двумя резервуарами составят $13 000.

Стоимость монтажа обычно варьируется от 50% до 75% стоимости оборудования. Исходя из 75% стоимости оборудования, монтаж описанного выше сиккативного осушителя с одним резервуаром обойдется в $4 875. Монтаж осушителя с двумя резервуарами будет стоить $9 750.

Расходы на эксплуатацию сиккативного осушителя включают в себя стоимость замены сиккатива и удаление раствора. Поскольку гранулы сиккатива растворяются по мере поглощения влаги из газа, рабочий слой соли нужно периодически пополнять. Получающийся раствор должен быть удален, переработан или захоронен.

Рис. 7 иллюстрирует подсчет стоимости эксплуатации осушителя мощностью 1 млн. фут.^{3} (28 тыс. м^3). В зависимости от производителя, стоимость хлорида кальция может колебаться от $0,65 до $1,20 за фунт ($1,43 до $2,65 за кг). Приняв стоимость хлорида кальция за $1,20, получим итоговую стоимость ежедневных загрузок по 4,7 фунта (2,13 кг) (из таблицы рис. 4) $2 059. В примере, приведенном на рис. 4, в процессе удаления воды из газа до уровня, предусмотренного

стандартом (т.е. 7 фунтов/млн. фут.^{3} (112 кг/млн. м^3)), образуется совсем немного раствора: 4,7 фунта (2,13 кг) соли плюс 14 фунтов (6,35 кг) воды, удаленной из газа. Итого 18,7 фунтов (8,48 кг) раствора в день - немногим больше 2 галлонов (7,5 литров) в день.

Рис. 7: Определение стоимости эксплуатации сиккативного осушителя

Где:

TO	= Общая стоимость эксплуатации, $/год
CD	= Стоимость сиккатива, $/год
CB	= Стоимость захоронения раствора, $/год
I	= Содержание воды на входе, фунтов/млн. фут.^{3}
O	= Содержание воды на выходе, фунтов/млн. фут.^{3}
F	= Поток газа, млн. фут.^{3}/сут.
P	= Цена сиккатива, $ за фунт
D	= Дневной расход сиккатива, фунтов/сут.
S	= Плотность раствора CaCl2, фунтов/баррель
BD	= Стоимость захоронения раствора, $/баррель
LC	= Стоимость работ, $
LT	= Трудозатраты оператора на загрузку сиккатива, час.
LR	= Зарплата оператора, $/час.

Дано:

F	= 1 млн. фут.^{3}/сут. газа при 8,33°C (47°F) и 450 фунтах на кв. дюйм
P	= $1,20 за фунт хлорида кальция (данные производителя)
D	= 4,7 фунтов сиккатива в день (рис. 4)
S	= 490 фунтов/баррель
BD	= $1,00/баррель[1]
LT	= 1 час в неделю
LR	= $30 в час

Вычисляем:

CD = D*P*365 дней/год
= 4,7*1,2*365
= $2 059/год

CB $= \frac{[((I-O)*F)+D]*BD*365 \text{ дней/год}}{S}$

$= \frac{[((21-7)*1)+4,7]*1,0*365}{490}$

= 14 $/год

LC = LT *LR *52 недель/год
= 1*30*52
= $1 560/год

TO = CD+CB+LC
= $2 059+$14+$1 560
= $3 633/год

[1] GRI *Atlas of Gas-Related Produced Water for 1990*, Май 1995 г.

Этап 4: Оценка экономии. Замена гликолевого осушителя сиккативным дает значительную экономию газа и снижает затраты на эксплуатацию и обслуживание.

Определение чистой экономии газа

Объем сэкономленного газа можно оценить путем сравнения эмиссии и затрат газа в существующем гликолевом осушителе с утечкой газа при сиккативной осушке. Партнеры могут определить экономию газа, приняв во внимание следующие 5 факторов.

Определение чистой экономии газа

Суммировать экономию от предотвращения:

- Утечки газа из гликолевого осушителя.
- Утечки газа из устройств пневматического управления.
- Сжигания газа в гликолевом регенераторе.
- Сжигания газа в газовом нагревателе.

Вычесть:

- Утечку газа при сиккативной осушке.

★ **Оценка утечки газа при сиккативной осушке.** Объем утечки газа из гликолевого десорбера/регенератора равен объему газа, поглощенному ТЭГ. Чтобы определить это, партнерам понадобится знать поток газа, содержание воды на входе и выходе, отношение гликоль-вода, процент рециркуляции и уровень поглощения метана.

Рис. 8: Утечка газа из гликолевого осушителя

Где:

GV	= Среднегодовой объем утечки газа, тыс. фут.^{3}/год
F	= Поток газа, млн. фут.^{3}/день
W	= Содержание воды на входе/выходе, фунтов/млн. фут.^{3}
R	= Соотношение гликоль - вода, галлон/фунт[1]
OC	= Процент рециркуляции
G	= уровень поглощения метана, фут.^{3}/галлон[1]

Дано:

F	= 1 млн. фут.^{3}/сут. газа при 47°F и 450 фунтах на кв. дюйм
W	= 21 - 7 = 14 фунтов воды/млн. фут.^{3} (Рис. 4)
R	= 3 галлона/фунт (правило производителя)
G	= 3 фут.^{3}/галлон в теплообменных насосах (правило производителя)1
OC	= 150%

Вычисляем:

$$GV = \frac{(F*W*R*OC*G*365\text{дней/год})}{1\,000\ \text{фут.}^3/\text{тыс. фут.}^3}$$

$$= \frac{(1*14*3*1{,}5*3*365)}{1\,000}$$

= 69 тыс. фут.^{3}/год (2 тыс. м^3/год)

1 Из отчета: *"Оптимизация циркуляции гликоля и применение сепараторов-расширителей при гликолевой дегидратации"*.

Рис. 8 демонстрирует вычисления на примере осушителя мощностью 1 млн. фут.^{3} (28 тыс. м^3). В данном примере подразумевается использование теплообменного насоса без емкости контактного дегазирования. Используя правила производителя из отчета "Оптимизация циркуляции гликоля и установка емкости контактного дегазирования в гликолевых влагоотделителях", получаем эмиссию метана 69 тыс. фут.^{3} (1,93 тыс. м^3) в год.

★ **Оценка утечки газа из устройств пневматического управления.** Устройства пневматического управления широко используются для отслеживания и регулировки потоков газа и жидкости, температуры и давления в гликолевых осушителях. В частности, устройства регулируют потоки жидкости и газа в осушителях и сепараторах, температуру в регенераторах осушителя и давление в емкостях дегазирования (если таковые используются). В данном примере предполагается, что в установке гликолевого осушителя с газонагревателем есть утечки в четырех пневматических контроллерах: контроллерах уровня на контакторе и ребойлере и контроллерах температуры на ребойлере и газонагревателе. Сепараторов-расширителей нет. Также предполагается, что утечки во всех пневматических устройствах большие (т.е. в процессе эксплуатации они пропускают более 50 тыс. фут.^{3} (1,4 тыс. м^3) газа в год). Исходя из данных отчета GRI/EPA “Methane Emissions From the Natural Gas Industry”,Volume 12 – Pneumatic Devices, среднегодовая утечка метана из среднего пневматического устройства оценивается в 126 тыс. фут.^{3} (3,53 тыс. м^3) в год. Следовательно, четыре пневматических устройства дадут 504 тыс. фут.^{3} (14,11 тыс. м^3) эмиссии метана в год. Рис. 9 иллюстрирует пример.

Рис. 9: Утечка газа из устройств пневматического управления	
Где:	
GB	= Утечка газа, тыс. фут.^{3}/год
EF	= Фактор эмиссии, тыс. фут.^{3} утечки газа/пневм. устройство в год
PD	= Количество пневматических устройств
Дано:	
EF	= 126 тыс. фут.^{3}/устройство/год
PD	= 4 пневматических устройства/гликолевый осушитель
Вычисляем:	
GB	= EF*PD
	= 126*4
	= 504 тыс. фут.^{3}/год (14,3 тыс. м^3/год)
1 Отчет GRI/EPA *“Methane Emissions From the Natural Gas Industry”,Volume 12*	

★ **Оценка количества газа, сожженного в гликолевом регенераторе.** В гликолевом осушителе природный газ используется для выпаривания воды из гликоля в регенераторе/ребойлере. Приняв, что ребойлер потребляет тепла 1 124 Btu на галлон (74,2 ккал/л) ТЭГ, получаем расход газа ребойлером 17 тыс. фут.^{3} (0,48 тыс. м^3) в год. Рис. 10 иллюстрирует вычисления.

Рис. 10: Газ, сожженный в гликолевом ребойлере	
Где:	
FGR	= Газ, сожженный в ребойлере, тыс. фут.^{3}/год
F	= Поток газа, млн. фут.^{3}/сут.
W	= Содержание воды на входе/выходе, фунтов/млн. фут.^{3}
Qr	= Потребление тепла ребойлером, Btu на галлон ТЭГ[1]
Hv	= Теплоотдача природного газа[2], Btu/станд. фут^3
R	= Соотношение гликоль - вода, галлон ТЭГ/ фунт воды[3]
Дано:	
F	= 1 млн. фут.^{3}/сут.
W	= 21 - 7 = 14 фунтов воды/млн. фут.^{3}
Qr	= 1 124 Btu/галлон ТЭГ
Hv	= 1 027 Btu/станд. фут^3
R	= 3 галлона ТЭГ/фунт удаленной воды
Вычисляем:	
FGR	$= \frac{(F*W*Qr*R*365 \text{ дней/год})}{Hv*1\ 000 \text{ фут.}^3\text{/тыс. фут.}^3}$
	$= \frac{(1*14*1\ 124*3*365)}{1\ 027*1\ 000}$
	= 17 (0,5) тыс. фут.^{3} (тыс. м^3)/ год

[1] На основании калькуляции из *Engineering Data Book*, Том 2, 11е издание, Gas Processors Supply Association, 1998, Section 20-Dehydration.
[2] Energy Information Administration (EIA), Monthly Engineering Review, Table A4.
[3] Из отчета: *"Оптимизация циркуляции гликоля и применение сепараторов-расширителей при гликолевой дегидратации"*.

★ **Оценка количества газа, сожженного в газовом нагревателе.** ТЭГ плохо работает при низких температурах. В результате, как правило, газ нагревают перед его поступлением в осушитель. В качестве топлива для газонагревателя используется природный газ. Объем газа, сожженного при обогреве 1 млн. фут.^{3} (28 тыс. м^3) добытого газа в сутки, с 47°F (8,33°C) до предполагаемых 90°F (32°C), составит 483 тыс. фут.^{3} (13,5 тыс. м^3) в год. Рис. 11 иллюстрирует вычисления.

★ **Оценка утечки газа из сиккативного осушителя.** Утечка газа из сиккативного осушителя определяется вычислением объема газа, выпускаемого каждый раз из резервуара при снятии давления в процессе наполнения. Чтобы определить объем выпущенного газа, партнерам нужно знать объем резервуара и долю этого объема, занимаемую газом. Резервуар (рис. 6) с внешним диаметром 20 дюймов (50,8 см) имеет внутренний диаметр примерно 19,25 дюймов (49 м) (при толщине стенки 3/8 дюйма (0,95 см)). Резервуар имеет среднюю длину 76,75 дюймов (195 см), 45% его объема заполнено газом. В соответствии с законом Бойля, объем газа, выпущенного в атмосферу в процессе стравливания давления из резервуара, составит 10 тыс. фут.^{3} (0,28 тыс. м^3) в год. Рис. 12 иллюстрирует вычисления.

Рис. 11: Объем газа, сожженного в газонагревателе	
Где:	
FGH	= Газ, сожженный в газонагревателе, тыс. фут.^{3}/год
Hv	= Теплоотдача природного газа, Btu/фут.^{3}
Cv	= Удельная теплоотдача природного газа, Btu/фунт °F
D	= Плотность природного газа, фунтов/фут.^{3}
ΔT	= (T2-T1) изменение температуры, °F
F	= Поток газа, млн. фут.^{3}/сут.
E	= Эффективность
Дано:	
Hv	= 1,027 Btu/фут.^{3}
Cv	= 0,441 Btu/фунт °F
D	= 0,0502 фунтов/фут.^{3}
ΔT	= 43 °F (90 - 47) °F
F	= 1 млн. фут.^{3}/сут.
E	= 70%
Вычисляем:	
FGH	$= \frac{(F*D*Cv*DT*365\text{дней/год}*1\,000\text{тыс. фут.}^3\text{/млн. фут.}^3)}{(Hv*E)}$
	$= \frac{(1*0{,}0502*0{,}441*43*365*1\,000)}{(1\,027*0{,}7)}$
	= 483 тыс. фут.^{3}/год (13,7 тыс. м^3/год)

★ **Оценка чистой экономии газа.** Чистая экономия газа складывается из суммы предотвращенной эмиссии и истраченного в гликолевом осушителе газа, за минусом газа, выпущенного из сиккативного осушителя в процессе наполнения сиккативом. В данном примере чистая экономия газа составляет 1 063 тыс. фут.^{3} (30 тыс. м^3) в год. При цене на газ $3,00/тыс. фут.^{3} ($106/тыс. м^3) стоимость сэкономленного газа составит $3 189 в год. Природный газ содержит 90% метана. Таким образом, общая предотвращенная эмиссия метана составит 90% от разности объема газа, эмитированного гликолевым осушителем и пневматическими устройствами (рис. 8 и 9 соответственно), и выпущенного из сиккативного осушителя (рис. 12), в данном случае 507 тыс. фут.^{3} (14,2 тыс. м^3) в год. Рис. 13 иллюстрирует вычисления.

Рис. 12: Утечка газа из сиккативного осушителя

Где:

GLD = Утечка газа из сиккативного осушителя, тыс. фут.^{3}/год
H = Высота резервуара осушителя, фут.
D = Внутренний диаметр резервуара, фут.
P_1 = Атмосферное давление, psia
P_2 = Давление газа, psig
П = число Пи
%G = доля газа в объеме заполненного резервуара
T = Время между загрузками, сут.

Дано:

H = 76,75 дюймов (6,40 футов)[1]
D = 19,25 дюймов (1,6 футов)
P_1 = 14,7 psia
P_2 = 450 psig + 14,7 (464,7 psig)
П = 3,14
%G = 45% (правило производителя)[1]
T = 7 дней

Вычисляем:

$$GLD = \frac{(H*D^2*\Pi*P_2*\%G*365\text{дней/год})}{(4*P_1*T*1\,000\text{фут.}^3/\text{тыс. фут.}^3)}$$

$$= \frac{(6{,}4*1{,}6^2*3{,}14*464{,}7*0{,}45*365)}{(4*14{,}7*7*1\,000)}$$

= 10 тыс. фут.^{3}/год (0,3 тыс. м^3/год)

[1] По данным Van Air.

Рис. 13: Общая экономия газа

Вычисляем:

TGS = Общая экономия газа (тыс. фут.^{3}/год)
= рис. 8 + рис. 9 + рис. 10 + рис. 11 + рис. 12
= 69 + 504 + 17 + 483 - 10
= 1 063 тыс. фут.^{3}/год
Экономия = 1 063 тыс. фут.^{3}/год * $3/тыс. фут.^{3}
= $3 189/год

Сокращение эмиссии метана

TMER = Чистое сокращение эмиссии метана
TMER = 90% * (Рис. 8 + Рис. 9 - Рис. 12)
= 0,9 * (69 + 504 - 10)
= 507 тыс. фут.^{3}/год (14,3 тыс. м^3/год)

Расчет экономии по эксплуатации и обслуживанию

Необходимо также учитывать издержки (трудозатраты), связанные с разницей в эксплуатации и обслуживании гликолевых и сиккативных осушителей.

В стоимость эксплуатации сиккативного осушителя входят стоимость наполнения сиккативом, удаления раствора и трудозатраты. Поскольку сиккативный осушитель не имеет движущихся частей и не нуждается в питании, стоимость обслуживания ничтожно мала. Стоимость наполнения и удаления раствора, уже рассчитанная в таблице рис. 7, составляет $2 059 и $14 в год соответственно. Трудозатраты предполагают один час в неделю на наполнение сиккативного осушителя. При $30 в час это составит около $1 560 в год.

Стоимость эксплуатации гликолевого осушителя включает в себя поддержание уровня гликоля в емкости. Обслуживание и трудозатраты включают проверку и чистку механических систем, периодический ремонт насоса и пневматических контроллеров и ежегодную чистку форсунок ребойлера и газонагревателя. Стоимость гликоля составляет $450 за галлон, его расход обычно - 0,1 галлона на млн. фут.^{3} (0,015 литров на тыс. м^3) переработанного газа. В нашем случае получится около 37 галлонов (140 литров) гликоля в год или $167 в год. Трудозатраты составят в среднем два часа в неделю на обслуживание и ремонт оборудования. По $30 в час это составит около $3 120 в год. Стоимость запчастей оценивается примерно в половину стоимости трудозатрат или $1 560 в год. Таким образом, общие затраты на эксплуатацию, обслуживание и рабочую силу в данном примере с гликолевым осушителем составляют $4 847 в год.

Этап 5: Экономический анализ. В заключение необходимо сравнить стоимость внедрения, среднегодовую стоимость эксплуатации и обслуживания обеих установок, а также стоимость сэкономленного или затраченного/потерянного газа в обоих случаях. В таблице рис. 14 приведено сравнение стоимости внедрения, эксплуатации и обслуживания сиккативного и гликолевого осушителей (перерабатывающих 1 млн. фут.^{3} (28 тыс. м^3) природного газа в сутки, под давлением 450 фунтов на кв. дюйм (3,1МПа), при температуре 47°F (8,33°C)). В таблице рис. 15 сравниваются объем и стоимость газа, потребленного или потерянного каждой установкой.

Рис. 16 показывает, какую экономию партнер программы Natural Gas STAR может ожидать по истечении 5 лет после замены существующего гликолевого осушителя мощностью 1 млн. фут.^{3} (28 тыс. м^3) в сутки при параметрах газа 450 фунтов на кв. дюйм (3,1 МПа) и 47°F (8,33°C) на сиккативный.

Рис. 14: Сравнение стоимости сиккативного и гликолевого осушителей		
1 млн. фут.^{3} (28 тыс. м^3) в сутки под давлением 450 фунтов на кв. дюйм (3,1 МПа) и 47°F (8,33°C)		
Виды затрат и экономия	**Сиккатив, $/год**	**Гликоль, $/год**
Стоимость внедрения		
Капитальные затраты		
Сиккатив[1] (включая начальное наполнение)	13 000	
Гликоль		20 000
Другие затраты (монтаж и наладка)[2]	9 750	15 000
Всего затрат на внедрение:	22 750	35 000
Среднегодовая стоимость эксплуатации и обслуживания		
Сиккатив		
Стоимость наполнения сиккативом[3] ($1,20/фунт)	2 059	
Стоимость удаления раствора[3]	14	
Стоимость рабочей силы[4]	1 560	
Гликоль		
Стоимость наполнения гликолем[4] ($4,50/галлон)		167
Стоимость работы и материалов[4]		4 680
Среднегодовая стоимость эксплуатации и обслуживания:	3 633	4 847

[1] Предполагая, что два резервуара работают независимо, см. рис. 5.
[2] Предполагая, что стоимость монтажа составляет 75% стоимости оборудования.
[3] Значения из таблицы рис. 7.
[4] См. Этап 4. Оценка экономии.

Рис. 15: Сравнение объема потребленного/утерянного газа и стоимости				
1 млн. фут.^{3} (28 тыс. м^3) в сутки под давлением 450 фунтов на кв. дюйм (3,1 МПа) и 47°F (8,33°C)				
Виды потерь и потребления	**Сиккатив**		**Гликоль**	
	тыс. фут.^{3} (тыс. м^3)/год	**$/год[1]**	**тыс. фут.^{3} (тыс. м^3)/год**	**$/год[1]**
Потребление газа				
Топливо (рис. 10 и 11)	-	-	500 (14,1)	1 500
Потери газа				
Пневматические устройства (рис. 9)	-	-	504 (14,3)	1 512
Утечки (рис. 8 и 12)	10 (0,28)	30	69 (2)	207
Всего:	10 (0,28)	30	1 073 (30,4)	3 219
Эмиссия метана[2]:	10 (0,28)	-	507 (14,3)	-

[1] Цена газа $3/тыс. фут.^{3} ($106/тыс. м^3)
[2] Значения взяты из рис. 12 и 13

Рис. 16: Экономические показатели замены гликолевого осушителя на двухрезервуарный сиккативный осушитель						
Виды затрат и экономия [1]	**Год 0 ($/год)**	**Год 1 ($/год)**	**Год 2 ($/год)**	**Год 3 ($/год)**	**Год 4 ($/год)**	**Год 5 ($/год)**
Капитальные затраты	(22 750)					
Исключенные затраты на эксплуатацию и обслуживание		4 847	4 847	4 847	4 847	4 847
Затраты на эксплуатацию и обслуживание сиккативного, $/год		(3 633)	(3 633)	(3 633)	(3 633)	(3 633)
Стоимость сэкономленного газа		3 219	3 219	3 219	3 219	3 219
Стоимость высвободившегося оборудования	10 000[2]					
Всего, $	(12 750)	4 433	4 433	4 433	4 433	4 433
NPV (чистая приведенная стоимость)3 = $3 137 IRR (внутренняя норма прибыли) 4 = 21% Срок окупаемости (лет) = 2,9						

[1] Все значения затрат взяты из рис. 14 и 15. Цена газа $3,00/тыс. фут.^{3} ($106/тыс. м^3).
[2] Исходя из 50% капитальной стоимости гликолевого осушителя.
[3] NPV рассчитана, исходя из ставки дисконтирования 10% за 5 лет.
[4] IRR рассчитана на 5 лет.

Опыт применения

Сиккативные осушители позволяют сокращать выбросы метана в процессе осушки с экономической выгодой для предприятия. Опыт партнеров показывает следующее:

- ★ Применение сиккативных осушителей дает значительные экономические выгоды, такие, как рост эффективности производства, снижение капитальных затрат и затрат на эксплуатацию и обслуживание, в условиях высоких давлений и низких температур на установках с невысокой производительностью.
- ★ Стоимость восполнения сиккатива немного больше по сравнению с гликолем, потому что сиккатив растворяется в воде и должен восполняться регулярно, в то время как гликоль используется повторно.
- ★ Сиккативные осушители эффективны в плане снижения эмиссии метана, ЛОС и ОАЗ, что в результате дает как экономические, так и экологические выгоды.
- ★ Сокращение эмиссии метана за счет замены гликолевой осушки на сиккативную должно быть включено в годовой отчет программы Natural Gas STAR.

Литература

Acor, Lori G. and David Mirdadian. *Benefits of Using Deliquescing Desiccants for Gas Dehydration.* Society of Petroleum Engineers (SPE82138), 2003.

Bowman, Bob. *Benefits of Using Deliquescing Desiccants for Gas Dehydration.* Society of Petroleum Engineers (SPE 60170), 2000.

Dow Chemical Company, product literature. *Gas Dehydration with PELADOW DG Calcium Chloride.*

Energy Information Administration. *Monthly Energy Review*, 2002, Table A4.

Eskrigge, Charles. Air and Vacuum Process Inc. (Van Air), personal contact.

Gas Processors Supply Association. *Engineering Data Book*, Volume II, 11th edition, 1998, Section 20-Dehydration.

Gas Research Institute. *Atlas of Gas-Related Produced Water for 1990*. (GRI-95/0016, May 1995).

Gas Research Institute. *Methane Emissions From the Natural Gas Industry*, 1996, Volume 12 (GRI-94/0257.29). June 1996.

Murray, Curt. *Practical Methods of Drying Natural Gas*. Pride of the Hills MFG., Inc.

Murray, Curt. Pride of the Hills Mfg., Inc., personal contact.

Smith, Reid. BP, personal contact.

The Hanover Compressor Company. personal contact.

Tingley, Kevin. U.S. EPA Natural Gas STAR Program, personal contact.

U.S. Environmental Protection Agency. *Lessons Learned: Optimize Glycol Circulation and Install Flash Tank Separators in Glycol Dehydrators* (EPA430-B-03-013, May 2003).

U.S. Environmental Protection Agency. *Lessons Learned: Replacing Gas—Assisted Glycol Pumps with Electric Pumps* (EPA430-B-03-014, May 2003).

Vavro, Matthew E. *Minimizing Natural Gas Dehydration Costs with Proper Selection of Dry Bed Desiccants and New Dryer Technology*. Society of Petroleum Engineers (SPE37348), 1996.

Zavadil, Duane. Williams Production, personal contact.

Приложение A

Равновесное с сиккативом содержание влаги в природном газе (фунтов воды на млн. фут.^{3} газа)

Гигроскопичные сиккативные таблетки хлорида кальция

	10 PSIG	25 PSIG	50 PSIG	75 PSIG	100 PSIG	125 PSIG	150 PSIG	175 PSIG	200 PSIG	225 PSIG	250 PSIG	275 PSIG	300 PSIG	350 PSIG	400 PSIG	500 PSIG	750 PSIG	1000 PSIG
80°F	344	219	134	98	77	64	55	48	43	39	35	33	30	27	23.6	19.7	14.3	11.6
75°F	292	186	113	83	65	54	46	41	36	33	30	28	26	22.5	20.1	16.8	12.2	9.9
70°F	246	157	96	70	55	46	39	43	31	27	25	23.4	21.7	19.1	17.1	14.3	10.4	8.5
65°F	207	132	81	59	47	39	33	29	26	23.5	21.4	19.8	18.4	16.2	14.5	12.1	8.9	7.3
60°F	174	111	68	50	39	33	29	24.5	21.9	19.8	18.1	16.8	15.5	13.7	12.3	10.3	7.6	6.2
58°F	162	103	63	46	36	31	26	22.8	20.3	18.4	16.8	15.6	14.4	12.9	11.4	9.6	7	5.8
56°F	150	96	59	43	34	29	24.1	21.2	18.9	17.1	15.7	14.5	13.4	11.8	10.6	8.9	6.6	5.4
54°F	140	89	55	40	32	26	22.5	19.8	17.6	16	14.6	13.5	12.6	11.1	9.9	8.3	6.2	5.1
52°F	130	83	51	37	29	24.5	21	18.4	16.4	14.9	14.4	12.6	11.7	10.3	9.3	7.8	5.8	4.7
50°F	121	77	47	35	27	22.8	19.5	17.1	15.3	13.9	12.7	11.7	10.9	9.6	8.6	7.2	5.4	4.4
45°F	100	64	39	29	22.7	18.9	16.2	14.3	12.7	11.5	10.6	9.8	9.1	8	7.2	6.1	4.5	3.7
40°F	83	53	32	24	18.8	15.6	13.4	11.8	10.5	9.6	8.8	8.1	7.5	6.7	6	5	3.8	3.1
35°F	68	44	27	19.6	15.5	13	11.1	9.8	8.7	7.9	7.2	6.7	6.2	5.5	5	4.2	3.1	2.6

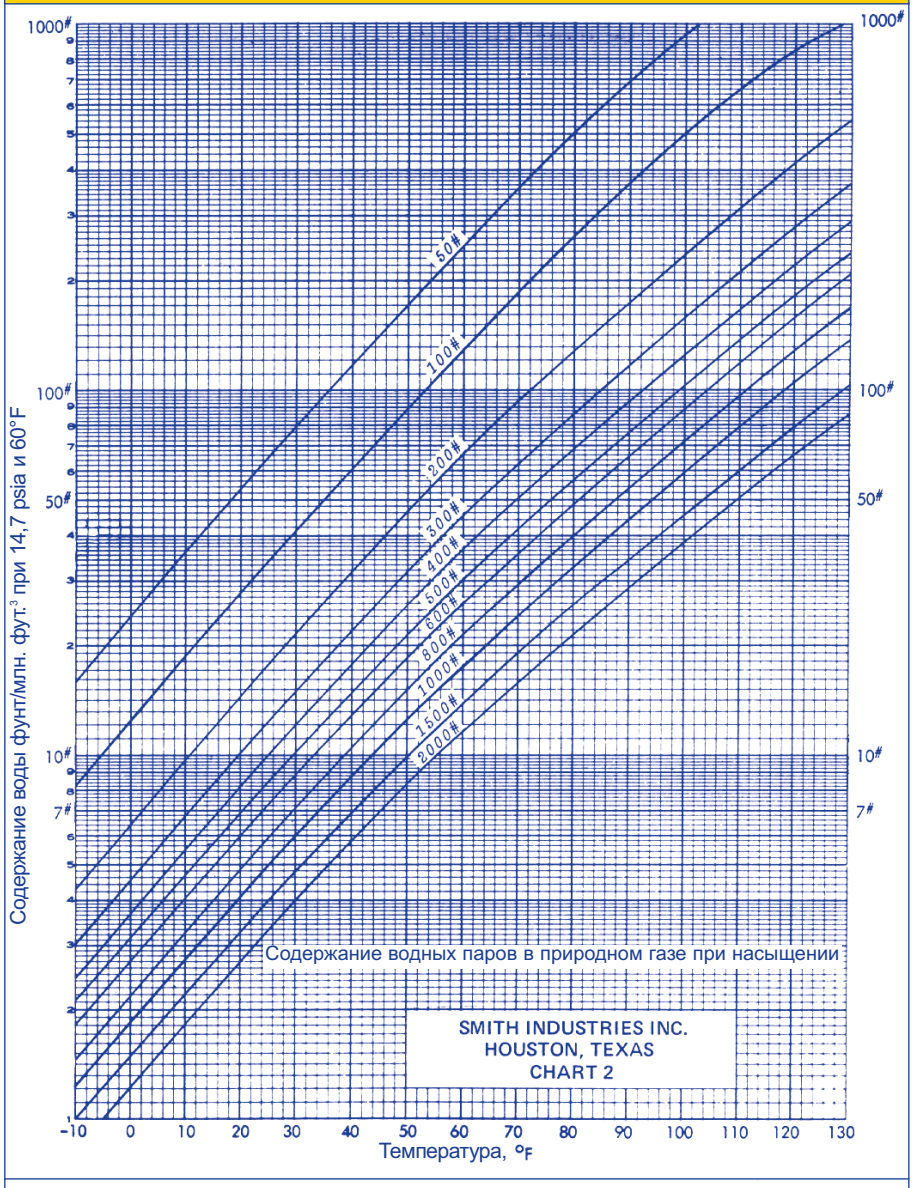
Гигроскопичные сиккативные таблетки хлорида лития

	10 PSIG	25 PSIG	50 PSIG	75 PSIG	100 PSIG	125 PSIG	150 PSIG	175 PSIG	200 PSIG	225 PSIG	250 PSIG	275 PSIG	300 PSIG	350 PSIG	400 PSIG	500 PSIG	750 PSIG	1000 PSIG
80°F	128	81	50	36	29	23.7	20.2	17.8	15.8	14.3	13	12	11.1	9.8	8.7	7.3	5.3	4.3
75°F	108	69	42	31	24.2	20	17.2	15.1	13.4	12.1	11.1	10.2	9.5	8.3	7.4	6.2	4.5	3.7
70°F	91	59	36	26	20.4	17	14.5	12.7	11.3	10.3	9.4	8.7	8	7.1	6.3	5.3	3.8	3.1
65°F	77	49	30	21.9	17.2	14.3	12.2	10.8	9.6	8.7	7.9	7.3	6.8	6	5.4	4.5	3.3	2.7
60°F	65	41	25	18.4	14.5	12.1	10.3	9.1	8.1	7.4	6.7	6.2	5.7	5	4.5	3.8	2.8	2.3
58°F	60	38	23.4	17.1	13.5	11.2	9.6	8.4	7.5	6.8	6.2	5.7	5.3	4.7	4.2	3.5	2.6	2.1
56°F	56	37	21.7	15.9	12.5	10.5	8.9	7.8	7	6.3	5.8	5.4	5	4.4	3.9	3.3	2.4	2
54°F	52	33	20.3	14.8	11.7	9.7	8.3	7.3	6.5	5.9	5.4	5	4.6	4.1	3.7	3.1	2.3	1.8
52°F	48	31	18.9	13.8	10.9	9	7.7	6.8	6.1	5.5	5	4.7	4.3	3.8	3.4	2.9	2.1	1.7
50°F	45	29	17.5	12.8	10.1	8.4	7.2	6.4	5.6	5.1	4.7	4.4	4	3.5	3.2	2.7	2	1.6
45°F	37	23.8	14.5	10.7	8.4	7	6	5.3	4.7	4.3	3.9	3.6	3.3	2.9	2.6	2.2	1.6	1.3
40°F	30	19.6	12	8.7	6.9	5.8	4.9	4.4	3.9	3.6	3.2	3	2.8	2.4	2.2	1.8	1.4	1.1
35°F	25	16.1	9.9	7.2	5.7	4.8	4.1	3.6	3.2	2.9	2.7	2.5	2.3	2	1.8	1.5	1.1	0.9

Источник: Van Air

Приложение B

Содержание водных паров в природном газе при насыщении



Источник: Smith Industries, Inc., Houston, Texas

United States
Environmental Protection Agency
Air and Radiation (6202J)
1200 Pennsylvania Ave., NW
Washington, DC 20460

EPA430-B-03-016
Ноябрь 2003 г.