



METHANE
GUIDING
PRINCIPLES

Сокращение выбросов метана: Руководство
по передовому опыту
Утечки из оборудования

Ноябрь 2019



Заявление об ограничении ответственности

Данный документ разработан в рамках партнерства Methane Guiding Principles. В руководстве приведена сводка существующих известных мер по снижению уровня выбросов, затрат и доступных технологий на дату публикации, но со временем они могут быть изменены или усовершенствованы. Приведенная информация, насколько это известно авторам, является точной, но она не обязательно отражает взгляды или позиции всех подписантов, или организаций, поддерживающих партнерство Methane Guiding Principles, и читатели должны будут самостоятельно оценить предоставленную информацию. Читателям не предоставляется каких-либо гарантий относительно полноты или точности информации, приведенной в данном Руководстве корпорацией SLR International и ее подрядчиками, партнерством Methane Guiding Principles или подписавших ее сторон или поддерживающих организаций.

В данном Руководстве описываются действия, которые организация может предпринять для управления выбросами метана. Эти действия или рекомендации не являются обязательными; это лишь один из эффективных способов помочь контролировать выбросы метана. Другие подходы могут быть столь же эффективными, или более эффективными в конкретной ситуации. Действия, которые выбирают читатели, часто зависят от обстоятельств, конкретных рисков при управлении и применимого правового режима.

Содержание

Краткий обзор	2
Введение	3
Количественное определение неконтролируемых выбросов	6
Стратегии смягчения последствий	7
Чек-лист	14
Приложение: подробная информация о стратегиях смягчения последствий	15
Список литературы	23

Краткий обзор



В данном руководстве рассматриваются непреднамеренные утечки из оборудования под давлением, используемого в нефтегазовой промышленности. В данном документе эти утечки называются «неконтролируемыми утечками». Другие выбросы из оборудования, предназначенного для сжигания газа, описаны в документе 4 по передовому опыту «Сокращение выбросов метана при сжигании».

Неконтролируемые утечки обычно бывают вызваны дефектами или обычным износом в герметичных соединениях, таких как фланцевые прокладки, резьбовые соединения, уплотнение штока клапана или плохо сидящие клапаны. Неправильная установка может привести к утечкам, но чаще всего утечки возникают в результате обычного износа или напряжения, которое со временем повреждает герметичную поверхность. Утечки могут также происходить из стенки сосуда под давлением или трубопровода в результате ее коррозии или повреждения.

В данном руководстве рассматриваются источники утечек и стратегии смягчения последствий, которые можно использовать для обнаружения и устранения утечек, что позволяет снизить выбросы от неконтролируемых утечек. Ниже приведены общие стратегии смягчения последствий.

Важно отметить, что передовая практика по сведению к минимуму неконтролируемых утечек описана в нескольких руководствах по передовой практике. Утечки могут быть сведены к минимуму посредством:

- конструкции и эксплуатации (см. Руководство по проектированию и строительству);
- обнаружения утечек (как описано в данном руководстве);
- путем ремонта (как описано в данном руководстве и руководстве по оперативному ремонту); и
- систем управления (см. Руководство по постоянному совершенствованию).

Передовая практика по снижению скрытых утечек метана

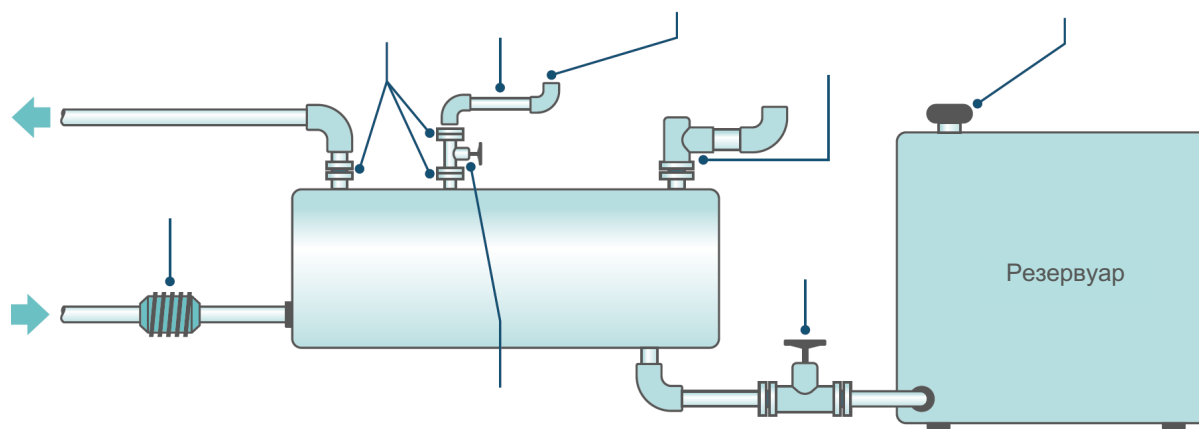
✓	Ведение точного учета утечек из оборудования
✓	Периодически проводить процедуры обнаружения и устранения утечек (LDAR) на всех объектах над землей
✓	Периодически проводить процедуры LDAR на всех трубопроводах под землей для выявления и устранения утечек
✓	Применение «специальных» или «альтернативных» программ, таких как: <ul style="list-style-type: none">• направленный осмотр и техническое обслуживание (DI & M), что является целевой программой; и• комплексные программы мониторинга, являющиеся альтернативными программами, некоторые из которых все еще находятся на стадии разработки
✓	Замена или устранение необходимости в компонентах, из которых постоянно происходят утечки

Введение

Непреднамеренные утечки из находящегося под давлением оборудования, используемого в нефтегазовой промышленности (неорганизованные утечки), могут привести к выбросу газа в атмосферу. Неконтролируемая утечка определяется как «выброс технологической жидкости в окружающую среду через уплотнение, резьбовое или механическое соединение, крышку, седло клапана, заусенец или точку незначительного повреждения компонентов оборудования при работе с углеводородным сырьем».

На рисунке 1 на примере оборудования показано, откуда могут происходить неконтролируемые утечки.

Рисунок 1: Примеры источников неконтролируемых утечек

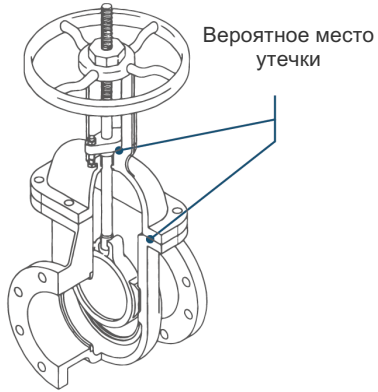
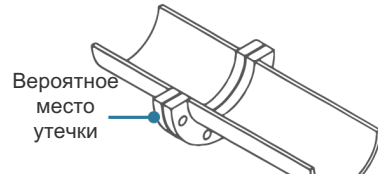
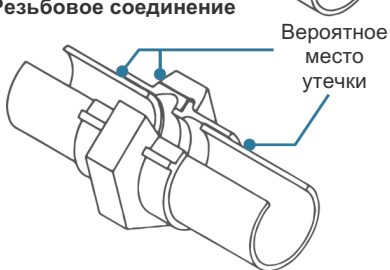
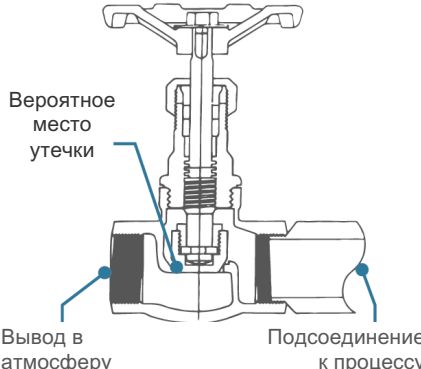


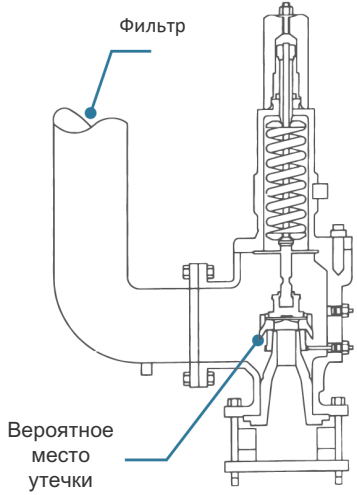


На большинстве нефтегазовых площадок имеются тысячи отдельных компонентов, которые могут стать причиной неконтролируемых утечек. Хотя утечка метана составляет всего лишь небольшой процент от утечки из этих компонентов оборудования, в совокупности это представляет собой потенциально значительный источник выбросов метана.

Несмотря на то, что отдельные неконтролируемые утечки имеют тенденцию быть небольшими, в совокупности все неконтролируемые утечки считаются основным источником выбросов. В Соединенных Штатах общий годовой выброс метана в результате неконтролируемых утечек по оценкам Агентства по охране окружающей среды США (EPA) составляет 16% от всех выбросов метана из систем нефти и природного газа^{1,2}. Такие же оценки были получены в других юрисдикциях, таких как Канада, где используется аналогичное оборудование³.

В приведенной ниже таблице 1 показаны распространенные компоненты оборудования, из которых могут происходить утечки.

Таблица 1: Распространенные компоненты

Компонент и место утечки	Описание	Диаграмма
<p>Клапаны</p>	<p>Утечки в результате:</p> <ul style="list-style-type: none"> • естественного износа; • повреждения или рассыхания уплотнителей, или кольцевых прокладок клапанов; или • разрыва диафрагмы на контрольном клапане. 	
<p>Соединения и фланцы</p>	<p>Утечки из фланцев обычно вызваны:</p> <ul style="list-style-type: none"> • повреждением прокладки между двумя соединительными болтами фланцев; <p>или</p> <ul style="list-style-type: none"> • смещением двух сопряженных участков трубы. <p>В случае резьбовых соединений, утечка может происходить из резьбы.</p> <p>(Примечание: показан распространенный тип резьбового соединения.)</p>	<p>Фланцевые соединения</p>  <p>Резьбовое соединение</p> 
<p>Линии с незамкнутыми концами (OEL)</p>	<p>OEL - это запорные клапаны, которые обычно закрыты, но, когда они открыты, они будут выпускать газ прямо в атмосферу.</p> <p>Утечки могут быть вызваны износом или загрязнением седла клапана или ненадлежащим затягиванием закрытого клапана.</p>	

Компонент и место утечки	Описание	Диаграмма
<p>Клапаны сброса давления (PRV)</p>	<p>Клапаны сброса давления это, как правило, снабженные пружинами предохранительные клапаны, предназначенные для выпуска газа при достижении определенного давления, чтобы оборудование не подвергалось избыточному давлению.</p> <p>Утечки могут произойти, если плунжер клапана сброса давления не установлен должным образом, если уплотнение седла изношено или в него попал мусор. Утечки также могут возникать из-за «закипания седла», когда давление процесса приближается к давлению подъема клапана.</p>	
<p>Клапаны сброса давления, являющиеся замерными люками (также называемыми люками для отбора проб)</p>	<p>Люки могут быть источниками утечек, когда они открыты или не закрыты надлежащим образом, или если встроенное в люк предохранительное устройство после его открытия не закрывается. Неправильное уплотнение может быть вызвано неисправной прокладкой или её неправильной установкой.</p>	
<p>Стенка сосуда или трубы</p>	<p>Утечка может возникнуть в результате коррозии или повреждения от удара.</p> <p>В некоторых случаях для находящихся под землей более старых распределительных трубопроводов утечка может происходить из соединения или заглубленного соединения, но все же это считается утечкой из трубопровода.</p>	

Приведенные в таблице 1 схемы основаны на данных, приведенных в руководстве «Выбросы метана в газовой промышленности. Том 8: Утечки из оборудования», Научно-исследовательский институт газа, Агентство по охране окружающей среды США, июнь 1996 года⁴. Приведено фото люка резервуара от HY-BON/EDI, Cimarron Energy company.

Количественное определение неконтролируемых выбросов

Существует несколько способов количественного определения неконтролируемых выбросов. Методы количественной оценки выбросов метана дают такие показатели, как масса за время (например, килограммы в час) или объем за единицу времени (например, стандартные кубические метры в час), и могут быть выполнены посредством инженерных расчетов, непосредственного измерения источников метана или с использованием моделей. Приведенные ниже подходы перечислены в порядке от наименее точного метода к наиболее точному методу.

1. Количественная оценка объекта по совокупности – на основе количества участков и типичного уровня выбросов с этого типа участка.
2. Количественная оценка по совокупности оборудования – на основе количества основного оборудования и типичного уровня выбросов с этого типа оборудования.
3. Количественная оценка по компонентам:
 - Количественная оценка по количеству компонентов/совокупности – умножение количества компонентов на среднюю интенсивность выбросов на компонент.
 - Количественная оценка путем скрининга –, если был проведен скрининг для обнаружения утечек, компоненты могут быть отсортированы по категориям «утечка» и «отсутствие утечки», а число в этих категориях умножается на соответствующий коэффициент выбросов.
 - Количественная оценка путем прямого измерения утечек – все обнаруженные на участке утечки проверяются на скорость выбросов, чтобы получить наиболее точную оценку всех неорганизованных утечек на участке.

Использование скрининга или прямого измерения обеспечивает более точный обзор неорганизованных утечек и эффективности мер по смягчению последствий. Там, где используется этот метод, рекомендуется повторять его с интервалом не более одного года.

Можно использовать все вышеперечисленные методы, но только метод скрининга и метод прямого измерения приведут к количественной оценке, отражающей сокращение выбросов в результате проведения эффективных мер по смягчению последствий. Если используется подход оценки по совокупности, то оценки выбросов не изменятся, даже если меры контроля снизят фактические выбросы метана.

Стратегии смягчения последствий

- Выбросы метана из-за неконтролируемых утечек чаще всего уменьшаются с помощью периодического использования программ обнаружения и устранения утечек (LDAR), когда проводятся проверки для выявления и последующего устранения обнаруженных утечек.
 - В некоторых регионах программы обнаружения и устранения требуются нормативно-правовыми актами, но в других они являются добровольными. Частота проверок бывает разной (как правило, от ежемесячной до ежегодной). Разной бывает также техника осмотра.
 - Подмножества программ LDAR представляют собой «быстрые программы LDAR» или программы направленного контроля и технического обслуживания (DI&M), в которых выполняется проверка только целевой группы типов оборудования или компонентов. Например, программа может быть предназначена для проверки только тех типов оборудования, о которых известно, что они дают значительные утечки, или предназначена для выполнения только ограниченного ремонта, например, который считается экономически эффективным.
- Неконтролируемые утечки можно уменьшить, следуя «альтернативной программе обнаружения и устранения», в которой происходит комбинирование различных методов обнаружения с разными интервалами времени. Примеры разнообразны, но все они включают следующее.
 - Частые крупномасштабные исследования (например, с помощью спутника или аэрофотосъемки) в сочетании с менее частыми проверками компонентов
 - Непрерывный мониторингТакие альтернативные программы в настоящее время разрабатываются, и их пригодность будет зависеть от конкретного оборудования или компонентов и поэтому может варьироваться от объекта к объекту.
- Неконтролируемые утечки могут быть сведены к минимуму также путем замены типов компонентов, которые обычно дают протечки, или исключением потребности в таких компонентах.

Традиционно, до того, как оборудование для обнаружения утечек стало доступным, утечки идентифицировались человеком (или людьми), осматривающим оборудование или его компоненты без помощи приборов для обнаружения утечки. Эти проверки иногда называют аудио-, визуальными и обонятельными (AVO) осмотрами. Однако эти осмотры, основанные исключительно на зрении, слухе и запахе, не очень эффективны для обнаружения небольших утечек, утечек в шумных местах или утечек в местах, управляемых без участия человека, поэтому они не считаются эффективным способом обнаружения утечек. Исключение составляют сети распределения природного газа, в которые намеренно добавляются отдушки, что облегчает и повышает эффективность обнаружения утечки. Однако даже в этих системах распределения лучше проводить регулярные обследования с помощью приборов обнаружения.

Доступные ресурсы

Многие руководства по обнаружению и устранению утечек были разработаны для строго регулируемых нефтехимических объектов. Ниже приведены примеры таких руководств и стандартов.

- «Обнаружение и устранение утечек, Руководство по передовому опыту», Агентство США по охране окружающей среды, октябрь 1999 г.⁵
- «Неконтролируемые и диффузные выбросы, являющиеся общей проблемой промышленного сектора. Измерение неконтролируемого выброса паров, образующихся в результате утечек из оборудования и трубопроводов (Британский стандарт)», Британский институт стандартов, BS EN 15446, британский (и европейский) стандарт для обнаружения утечек⁶

В этих руководствах предполагается, что выполняется нормативный подход, разработанный для нефтехимической промышленности США под названием «Контрольный метод 21» (RM21). Этот подход заключается в регулярном обследовании на наличие утечек в сочетании с программой ремонта. На рисунке 2 показан обзор RM21, где каждая поверхность каждого компонента должна быть проверена с помощью соответствующего измерительного устройства, такого как пламенно-ионизационный детектор (ПИД).

Рисунок 2: Обзор RM21



Существует ряд программ и руководств по сокращению выбросов метана в результате неконтролируемых утечек, которые предназначены исключительно для газовой промышленности. В области природного газа большинство программ и правил обнаружения и устранения утечек в настоящее время являются менее строгими и более гибкими, чем руководства и стандарты по обнаружению и ремонту в нефтехимической области. Руководства и программы, относящиеся к природному газу, включают следующее.

- «Технический руководящий документ № 2: Оборудование и его компоненты с неконтролируемыми утечками», Коалиция «Климат и чистый воздух» (CCAC), «Нефтегазовое партнерство по метану» (OGMP), Последние изменения: Март 2017 г.⁷
- Программа Natural Gas Star «Рекомендуемые технологии для сокращения выбросов метана», программа Агентства по охране окружающей среды США, www.epa.gov/natural-gas-star-program/recommended-technologies-reduce-methane-emissions⁸
- «Руководство по передовому опыту в области управления метаном в нефтегазовом секторе», Европейская экономическая комиссия ООН (UNECE), проект, март 2019 г.⁹ (Это очень обширное международное руководство.)

За последнее десятилетие распространенным новым инструментом для обнаружения утечек в газовой промышленности стала камера оптической визуализации газа (ОВГ), которая представляет собой устройство инфракрасной визуализации с оптикой, фильтрами и охлаждаемыми датчиками, специально разработанными для обнаружения метана. Эти устройства создают изображение, которое позволяет увидеть невидимый иначе шлейф утечки газа. Доступно несколько типов таких камер с различными минимальными возможностями обнаружения, и производители продолжают их совершенствовать. На рисунке 3 приведено изображение используемых камер ОВГ.

Рисунок 3: Камеры ОВГ в действии



Источники: Техасский университет в Остине, и компания Heath Consultants Incorporated

В настоящее время доступны или скоро станут доступными многие новые технологии обнаружения. Большинство этих новых технологий еще не утверждены как подходящие для программ обнаружения и устранения утечек, в соответствии с требованиями нормативных актов, хотя они могут использоваться в добровольных программах. Действуют исследовательские программы, которые тестируют и сравнивают новые разработанные технологии. Эти технологии могут обеспечить более экономичное обнаружение и устранение утечек в газовой промышленности, по сравнению с тем, что достигается на данный момент с помощью одной только камеры ОВГ. В последних отчетах обобщены доступные технологии обнаружения. Ниже приведены примеры некоторых таких отчетов.

- «Обзор технологий ближнего радиуса действия и экранирования для снижения неконтролируемых выбросов метана при добыче нефти и газа», Фокс и др., *Environmental research Letters*, июль 2019 г.¹⁰
- «Оценка инновационных технологий обнаружения метана», *The Interstate Technology Regulatory Council*, сентябрь 2018 г.¹¹

Некоторые новые программы обнаружения и ремонта оцениваются в рамках альтернативных/эквивалентных программ по смягчению последствий, о которых пойдет речь далее в этом руководстве, и методом, описанным в журнальной статье «Структура эквивалентности сокращения выбросов метана для альтернативных программ обнаружения и устранения утечек», Фокс и др., *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2019¹².

Передовая практика по снижению неконтролируемых утечек метана обобщена в таблице 2. Более подробная информация об этих стратегиях смягчения последствий приведена в приложении.

Таблица 2: Передовая практика по снижению неконтролируемых утечек метана

Стратегии по смягчению последствий	Описание
<p>1. Периодическая реализация программ обнаружения и устранения утечек на всех объектах, находящихся над землей</p>	<p>а. На производственных площадках Рид и площадках транспортировки и хранения углеводородов для обнаружения утечек природного газа обычно используются камеры ОБГ, такие как специально разработанные охлаждаемые инфракрасные камеры (например, камеры FLIR GF320 или камеры OpGal EyeCGas). Камеры ОБГ используются в виде переносной аппаратуры, когда пользователь сканирует оборудование со всех сторон.</p> <p>б. Другой способ обнаружения с использованием устройств, таких как абсорбционная спектрометрия с перестраиваемым диодным лазером (TDLAS), которые измеряют концентрацию газа вдоль всех сканируемых путей. Примером такого устройства является сигнализатор RMLD производства фирмы Heath.</p> <p>в. Для осмотра с помощью съемок RM21 используются пламенно-ионизационные детекторы (ПИД) или другие аналогичные приборы. Несмотря на то, что это, вероятно, наиболее чувствительный и надежный метод обнаружения утечек, он является наиболее сложным и дорогостоящим. Сканирование объекта занимает больше времени, поэтому обычно это не тот метод, который используется для нефтегазовых объектов. Тем не менее, он используется, если это требуется регламентом.</p>
<p>2. Периодическая реализация программ обнаружения и устранения утечек на всех объектах, находящихся под землей</p>	<p>а. Обнаружение утечек обычно выполняется при обходе с помощью высокочувствительного детектора. Для того, чтобы утечки можно было обнаружить, они должны проходить от точки выброса на находящейся под землей трубе к поверхности.</p> <p>б. Утечку можно обнаружить также на автотранспортных средствах. В случае длинных трубопроводов, таких как магистральные газопроводы, может использоваться аэросъемка. Однако, эффективность аэросъемки для обнаружения утечек не была полностью доказана. Метод аэросъемки в основном связан с безопасностью, но по мере совершенствования технологий он может стать эффективным методом обнаружения утечек.</p>
<p>3. Проведение программы направленного осмотра и технического обслуживания (DI&M)</p>	<p>При таком подходе решения по управлению рисками используются для обнаружения и ремонта только на определенном оборудовании или компонентах, либо обнаружение выполняется на всем оборудовании и компонентах, но для ремонта приоритетными являются более значительные утечки.</p> <p>Целенаправленная программа требует обширной информации по всем выполненным ранее действиям по обнаружению утечек и ремонту, и использует эту информацию, чтобы определить, куда направить усилия.</p>

Таблица 2: Передовая практика по снижению неконтролируемых утечек метана (продолжение)

Стратегии по смягчению последствий	Описание
<p>4. Следовать альтернативной программе обнаружения и устранения утечек, такой как комплексная программа мониторинга</p>	<p>Исследовательские программы охватывают как обследования, так и постоянный мониторинг в качестве альтернативы существующим методам обнаружения и устранения утечек. Некоторые из этих альтернатив называются «комплексными программами мониторинга».</p> <p>Одной из таких исследовательских программ, разработанных в Университете штата Колорадо, является инициатива «Путь к эквивалентности», которая включает в себя широкий круг заинтересованных сторон и исследовательских групп в США и Канаде (Фокс и др., 2019). Эта инициатива охватывает:</p> <ul style="list-style-type: none"> • проверку потенциальных решений в полевых лабораториях; • моделирование стратегий смягчения последствий с использованием инструментов моделирования; • испытания для проверки потенциального решения в полевых условиях; и <p>работу с заинтересованными сторонами, чтобы побудить их принять соответствующие альтернативные программы обнаружения утечек и ремонта.</p>
<p>5. Замена компонентов, которые постоянно становятся источниками утечек</p>	<p>Этот шаг можно выполнить на этапе проектирования, уменьшив количество компонентов и соединений или заменив компоненты, из которых обычно происходит утечка.</p>

Дополнительную информацию о каждом из этих шести подходов к смягчению последствий можно найти в Приложениях.

Поскольку основной стратегией для сокращения выбросов из-за неконтролируемых утечек является программа обнаружения и устранения утечек (LDAR), необходимо рассмотреть некоторые важные элементы всех программ LDAR. Важно отметить, что эффективная программа LDAR начинается с «осведомленных и уполномоченных» операторов, которые:

- регулярно проводят поиск компонентов, генерирующих утечки в промежутках между официальными осмотрами и ремонта оборудования; и
- уполномочены сообщать и фиксировать их.

Ключевые элементы программы обнаружения и устранения утечек приведены в таблице 3.

Таблица 3: Ключевые элементы программы LDAR

Ключевой элемент	Описание	Комментарии
Идентификация компонентов*	Оператор должен иметь представление о различных компонентах, а также о том, как найти каждый из них и идентифицировать его во время проведения сканирования утечки.	Это касается в основном разведочно-промысловой системы, системы первичной переработки (добыча, сбор, переработка, транспортировка и хранение). Газораспределительные сети, которые состоят в основном из измерительных и регулировочных станций, подземных трубопроводов и измерительных станций клиентов, имеют уникальные материалы и меньше компонентов, поэтому идентификация этих компонентов является более простой задачей.
Выбор устройства обнаружения и определение утечки	Выбранное устройство в соответствии с представленной в письменном виде процедурой устанавливает самую низкую скорость утечки, которая может быть обнаружена. (Установка этой скорости известна как определение утечки.)	В некоторых нормативных подходах, таких как RM21, определение утечки может осуществляться при установленной скорости, которая находится в диапазоне концентраций частей на миллион (например, 500 частей на миллион в воздухе). Операции по транспортировке, переработке и сбыту часто сопровождаются утечками, определяемыми коммунальным предприятием и регулирующими органами.
Регулярный мониторинг компонентов	Этот элемент использует указанное устройство обнаружения, следуя письменной процедуре, с установленными интервалами времени. Чаще всего места утечки помечаются временными метками и, если их устранение не выполняется немедленно, вводятся в систему отслеживания утечек.	Некоторые нормативные подходы определяют метод. Например, Канадские правила и новые правила Агентства по охране окружающей среды США требуют, чтобы камеры ОВГ использовались на минимальном расстоянии от рассматриваемого объекта. В добровольных ненормативных программах могут использоваться другие методы обнаружения, но в идеале они должны быть сопоставимы с нормативными подходами.
Ремонт компонентов	Компоненты, из которых происходит утечка, следует отремонтировать как можно скорее. Компонент считается отремонтированным только после того, как проведена его проверка и доказано отсутствие утечки выше уровня определения утечки (часто это определяется, как невозможность обнаружения утечки камерой ОВГ).	Первые попытки проведения ремонта включают следующие действия. <ul style="list-style-type: none"> • Затяжка резьбовых соединений • Затяжка болтов крышки на клапанах или болтов на фланцевых прокладках • Замена болтов крышки • Затяжка упорных гаек сальника • Впрыскивание смазки в уплотнительную прокладку Элементы, которые не могут быть отремонтированы сразу или требующие больше времени для доступа, должны отслеживаться и обрабатываться при первой же возможности, например, во время простоя оборудования.

Таблица 3: Ключевые элементы программы LDAR (продолжение)

Ключевой элемент	Описание	Комментарии
Записи и обзоры	Следует хранить записи о проведенных осмотрах, обнаруженных утечках, а также о том, на каких компонентах и когда был выполнен ремонт. Эта информация может быть полезна для точного учета выбросов в результате неконтролируемых утечек.	<p>Ведение подробных и точных записей обычно требуется соответствующими нормативами. Это может включать электронные записи для обеспечения/контроля качества и аудиторской проверки.</p> <p>В добровольных подходах отслеживание в идеале должно быть достаточно точным для идентификации компонентов с повторяющимися сбоями и их замены или капитального ремонта.</p>

* Примечание к таблице 3: В отраслях с жесткими нормативными требованиями, таких как нефтехимия и переработка, задача по идентификации компонентов заключается в назначении уникального идентификационного номера каждому компоненту и закреплении на этом компоненте постоянного и уникального идентификационного ярлыка. Как правило, это не требуется в цепочке поставок природного газа, где компоненты могут быть отсканированы в совокупности, а идентифицируются и помечаются только те компоненты, из которых происходит утечка.

Чек-лист

Приведенный чек-лист позволит оценить прогресс в сокращении выбросов метана в результате неконтролируемых утечек. Последний столбец в контрольном списке предназначен для того, чтобы указать в нем процент всего оборудования, к которому уже была применена стратегия смягчения последствий.

Действие	Пометить после завершения	Процент оборудования, включенного в данную деятельность
✔ Ежегодный отчет, включающий оценки выбросов из-за утечек оборудования		
✔ Периодическое проведение программы LDAR		
✔ Выполнение целевой программы DI&M		
✔ Следовать альтернативной программе обнаружения и устранения утечек, такой как комплексная программа мониторинга		
✔ Замена или устранение компонентов, из которых утечка происходит часто		

Важно понимать, что этот простой чек-лист не является оценкой надежности или эффективности программы обнаружения и устранения утечек.

Приложение: подробная информация о стратегиях смягчения последствий

Стратегия по смягчению последствий 1: Периодическое проведение программ обнаружения и устранения утечек на всех объектах, находящихся над землей

Считается, что неконтролируемые утечки в совокупности вносят существенный вклад в общие выбросы метана и могут быть снижены посредством выполнения программы по обнаружению и устранению утечек.

Программы обнаружения и устранения утечек уже давно используются в локальных распределительных сетях, поскольку эти системы доставляют газ непосредственно на предприятия и в жилые дома, что может вызвать наибольшее неблагоприятное воздействие на население. В течение многих десятилетий, задолго до того, как деятельность по обнаружению утечек стала проводиться на разведочно-промысловых объектах, местные распределительные компании проводили регулярные проверки на утечку. В Северной Америке операции по обнаружению утечек проводятся раз в два, три года. На международном уровне осмотры могут проводиться более часто. Сообщения об утечках поступают также и от общественности, так как в подающийся в потребительскую сеть газ добавляется одушка, поэтому утечки легче обнаружить. Многие обнаруженные в этом сегменте утечки немедленно устраняются, но некоторая часть этих утечек просто отслеживается. Некоторые утечки из распределительной сети не устраняются немедленно на том основании, что они невелики и не представляют опасности для населения. В этих случаях, утечки контролируются.

В распределительных сетях США большинство утечек классифицируется по степени риска для безопасности (1, 2 или 3). Утечки 1-го уровня риска устраняются немедленно. Утечки 2-го уровня риска чаще всего включаются в программу устранения посредством ремонта «где-то в этом сезоне». Утечки 3-го уровня риска подвергаются мониторингу. В большинстве местных распределительных компаний постоянно отслеживаются тысячи утечек, хотя в некоторых юрисдикциях установлено максимальное время для проведения ремонта.

При работе по первичной переработке сырья, например, на заводах по переработке природного газа, во многих юрисдикциях требуется применение официальной программы обнаружения и устранения утечек, но только в области жидкостей, где происходит контроль пропана, бутана и более тяжелых летучих углеводородов. Входящий и выходящий газовые потоки, которые были в основном метаном, обычно не включались в программу обнаружения и устранения. Некоторые операторы добровольно добавили метан в свою программу обнаружения и устранения.

Исторически в разведочно-промысловых нефтегазовых операциях не было официальных программ обнаружения утечек. В последнее десятилетие в Северной Америке были приняты нормативы по обнаружению утечек и ремонта для некоторых операций разведочно-промысловой деятельности. Например, Агентство по охране окружающей среды США требует применять программы обнаружения и устранения утечек на новых и модифицированных источниках. В других регионах программы обнаружения и устранения утечек требуются на всех существующих источниках (например, в соответствии с Федеральным законом и провинциальными правилами Канады по нефти и газу). В некоторых штатах США есть правила, например, Регламент 7 штата Колорадо, которые требуют применения программ обнаружения и устранения утечек для всей разведочно-промысловой деятельности.

В других случаях некоторые операторы решили принять программу обнаружения и устранения утечек на всех объектах, а не только в регионах, где она требуется в соответствии с законодательством. Естественно, что программы добровольного обнаружения и устранения утечек, как правило, более гибкие, чем регуляторные программы.

Где эта стратегия является уместной

Предполагается, что любой наземный объект с находящимся под давлением оборудованием сократит выбросы, вызванные неконтролируемыми утечками, следуя программе регулярного обнаружения и устранения утечек.

На объектах разведочно-промысловой или перерабатывающей деятельности наиболее распространенным инструментом для обнаружения утечек является камера оптической визуализации газа (камера ОВГ), используемая человеком на близком расстоянии от исследуемого объекта. Это является принятой в Северной Америке программой обнаружения и устранения утечек. Разрешается также применение подхода Контрольный метод 21 (RM21) с использованием портативных пламенно-ионизационных детекторов (ПИД) но, как правило, его не используют, поскольку он требует непосредственного контакта со всеми поверхностями каждого компонента, и поэтому является намного более трудоемким и дорогим. Оборудование ПИД, используемое для подхода RM21, дешевле, чем оборудование ОВГ, но сам подход является более дорогим. Важно отметить, что технология RM21 для программ обнаружения и устранения утечек не менялась в течение более 20 лет, в то время как технология ОВГ все еще является относительно новой, и ее эффективность все еще является предметом изучения. Во многих юрисдикциях ОВГ признана эффективным методом. ОВГ намного реже используется в сегментах транспортировки, переработки и сбыта, поскольку размер утечек в распределительных системах часто бывает небольшим и, как правило, ниже порога обнаружения ОВГ.

Заключение

Несмотря на то, что программы обнаружения и устранения утечек использовались в других отраслях промышленности на протяжении десятилетий, их экономическая эффективность обоснована недостаточно. Отчасти это связано с тем, что обнаружение и устранение утечек часто использовалось, когда это требовалось нормативными актами, и поэтому не было стимула для изучения эффективности различной частоты или методов обнаружения, поскольку все они были определены техническими условиями. В своих недавних постановлениях Агентство по охране окружающей среды США исходило из того, что обнаружение и устранение утечек в операциях по разведочно-промысловой и перерабатывающей деятельности может привести к сокращению выбросов на 40% из-за неконтролируемых утечек, если они проводятся один раз в год, на 60%, если они выполняются каждые три месяца, и на 80%, если проводятся один раз в месяц. Однако это предположение еще не подкреплено подробными сведениями.

Экономическая эффективность программы обнаружения и устранения утечек, которая включает в себя все активы (оборудование и компоненты), должна учитываться при разработке добровольной программы, поэтому частота, методика и процедуры ремонта могут зависеть от решений по их экономической эффективности. Для нормативных программ частота, устройства и методы обычно являются заданными параметрами, поэтому у проекта может быть меньше вариантов исполнения.

Экономическая оценка любой меры по снижению утечек зависит от количества сокращенных или устраненных выбросов. Для конкретного объекта это обычно требует измерения или оценки скорости утечки по всем выявленным местам утечки в сравнении со стоимостью программы обнаружения и устранения. Исследования Международного консультативного форума ICF (см. ссылки) собирают данные и делают некоторые предположения относительно затрат и экономической эффективности.

Программы обнаружения и устранения утечек могут иметь и другие преимущества, такие как улучшение мнения заинтересованных сторон и привлечение инвесторов.

Стратегия по смягчению последствий 2: Периодическое проведение программ обнаружения и устранения утечек на всех объектах, находящихся под землей

Считается, что неконтролируемые утечки из подземных трубопроводов являются небольшим источником искусственных выбросов метана из систем сбора газа, трубопроводов и распределительных сетей. Обследования на предмет утечек из находящихся под землей трубопроводов проводятся в основном из соображений безопасности, а не исключительно для целей сокращения выбросов метана.

Наличие программы обнаружения и устранения поврежденных подземных трубопроводов может помочь выявить и определить места утечек, чтобы их можно было отремонтировать, в конечном итоге сократив общий объем выбросов от таких утечек.

Где эта стратегия является уместной

Регулярная программа обнаружения и устранения утечек может снизить выбросы любого находящегося под давлением газа.

Важно отметить, что даже в регулируемых юрисдикциях существуют различные требования к проверке утечек в находящихся под землей трубопроводах. Большинство распределительных сетей и многие магистральные трубопроводы по всему миру имеют одинаковые нормативные требования в отношении проведения обследований, но к большинству межпромышленных трубопроводов предъявляются нормативные требования по инспекции только в пределах установленного расстояния от заселенных зданий или в других средах с более высоким риском, таких как переходы через реки. Для магистральных трубопроводов часто используются аэрофотосъемки (посредством инфракрасных или спектроскопических приборов на самолетах, которые проводят съемку на предмет наличия шлейфов утечки, а также могут проводиться съемки на предмет нарушения покрова почвы и мертвой растительности), но на некоторых также используются наземные подходы обнаружения утечек при помощи детекторов газа, расположенных на транспортных средствах, которые перемещаются по полосе отчуждения. На магистральных трубопроводах осмотр часто проводится в большей степени из соображений безопасности, чем с целью сокращения выбросов.

В локальных распределительных сетях осмотр для обнаружения утечек проводится либо с помощью высокочувствительного детектора метана на транспортном средстве, либо с кем-то, кто несет портативный детектор метана. Здесь аэрофотосъемки не проводятся из-за помех со стороны зданий, рельефа и растительности.

Заключение

Если программа обнаружения и ремонта требуется по законодательству, оценку экономической эффективности программы проводить не обязательно. Что касается добровольных программ, то при их разработке необходимо учитывать их экономическую эффективность для трубопроводов, поэтому частота, методы и процедуры ремонта могут зависеть от решений по экономической эффективности.

Экономическая оценка любой меры по снижению утечек зависит от количества сокращенных или устраненных выбросов. Для конкретного объекта это обычно требует измерения или оценки скорости утечки по всем выявленным местам утечки в сравнении со стоимостью программы обнаружения и устранения.

Программы обнаружения и устранения утечек могут иметь и другие преимущества, такие как улучшение мнения заинтересованных сторон и привлечение инвесторов.

Стратегии по смягчению последствий 3: Проведение программы направленного осмотра и технического обслуживания (DI&M)

Считается, что неконтролируемые утечки в совокупности вносят существенный вклад в общие техногенные выбросы метана и могут быть снижены посредством выполнения программы по обнаружению и устранению утечек. Однако, если не существует нормативных требований, оператор может принять решение по реализации программы на ограниченной территории.

Для этого подхода необходима информация и знания о предыдущих действиях для обнаружения утечек, чтобы операторы могли быть уверены, что существуют типы оборудования или типы источников компонентов, которые редко имеют тенденцию к утечке, и поэтому проверки могут проводиться с более длительными интервалами. Для большинства оборудования предпочтительной является программа полного обнаружения и устранения утечек.

Если оператор обладает подробными знаниями об источниках утечек, он может сосредоточить свои усилия на типах оборудования или компонентов, которые являются известными источниками более крупных утечек, и уделять меньше внимания обследованию другого оборудования или компонентов. Такой подход может обеспечить более рентабельную и целенаправленную программу обнаружения и устранения утечек. Такое целенаправленное обнаружение и устранение утечек

Приложение: подробная информация о стратегиях по смягчению последствий

иногда называется «smart-LDAR» или «направленным осмотром и обслуживанием» (DI&M).

Даже при использовании целенаправленной программы, остальное оборудование и компоненты должны проверяться с регулярными интервалами времени.

Где эта стратегия является уместной

Предполагается, что любой наземный объект с находящимся под давлением оборудованием сократит выбросы, вызванные неконтролируемыми утечками, следуя программе регулярного обнаружения и устранения утечек.

Заключение

При разработке программ добровольного обнаружения и устранения утечек с выбранного оборудования и компонентов следует учитывать их экономическую эффективность, поэтому частота, методика и процедуры ремонта могут зависеть от решений по экономической эффективности.

Оборудование и компоненты, на которых должна сосредоточиться программа, могут быть определены на основе решений, основанных на первоначальной проверке всего оборудования, чтобы определить, где происходят наиболее значительные утечки. Например, оператор может определить, что большая часть неконтролируемых выбросов с участков сбора происходит в уплотнениях штока компрессора и линиях с открытым концом компрессора, и поэтому сфокусировать программу DI&M на обнаружение утечек только с этих источников, и исключить другие источники, которые не вносят значительный вклад в общий объем выбросов.

Экономическая оценка любой меры по снижению утечек зависит от количества сокращенных или устраненных выбросов. Для конкретного объекта это обычно требует измерения или оценки скорости утечки по всем выявленным местам утечки в сравнении со стоимостью программы обнаружения и устранения. Ключевым аспектом программы smart-LDAR является то, что она является более целенаправленной и, таким образом, снижает затраты на рабочую силу, что может являться важным фактором.

С любой программой обнаружения и устранения утечек, но особенно с целевыми программами, такими как smart-LDAR, после устранения самых больших утечек операторы, вероятно, получат меньшую отдачу от будущих циклов LDAR, поэтому может быть момент, когда частота обнаружения и ремонтные обследования могут быть скорректированы для поддержания экономической эффективности.

Стратегии по смягчению последствий 4: Следовать альтернативной программе обнаружения и устранения утечек, такой как комплексная программа мониторинга

Считается, что неконтролируемые утечки в совокупности вносят существенный вклад в общие техногенные выбросы метана и могут быть снижены посредством выполнения программы по обнаружению и устранению утечек. Если нет применимых нормативных требований или если нормативные требования являются гибкими, операторы могут выбрать обнаружение утечек с использованием альтернативной программы.

Посредством исследовательских программ, в которых изучались выбросы природного газа, выявлено, что небольшое количество источников выбросов (эмиттеров) несет ответственность за большую часть общих выбросов. Типичное эмпирическое правило, основанное на информации, собранной в США, заключается в том, что 4 до 5% эмиттеров дают от 40 до 50% или более выбросов (Лэмб и др., 2015; Зиммерл и др., 2015; Брандт и др., 2016)^{13,14,15}. Такая асимметрия в распределении выбросов повысило интерес к постоянному мониторингу или более частым обследованиям для обнаружения утечек в инфраструктуре природного газа. По сути, эти методы предназначены для быстрого обнаружения больших утечек, что способствует проведению быстрого ремонта и еще большему сокращению выбросов.

Альтернативные программы могут использовать альтернативные технологии для выполнения более широкого сканирования, способствуя

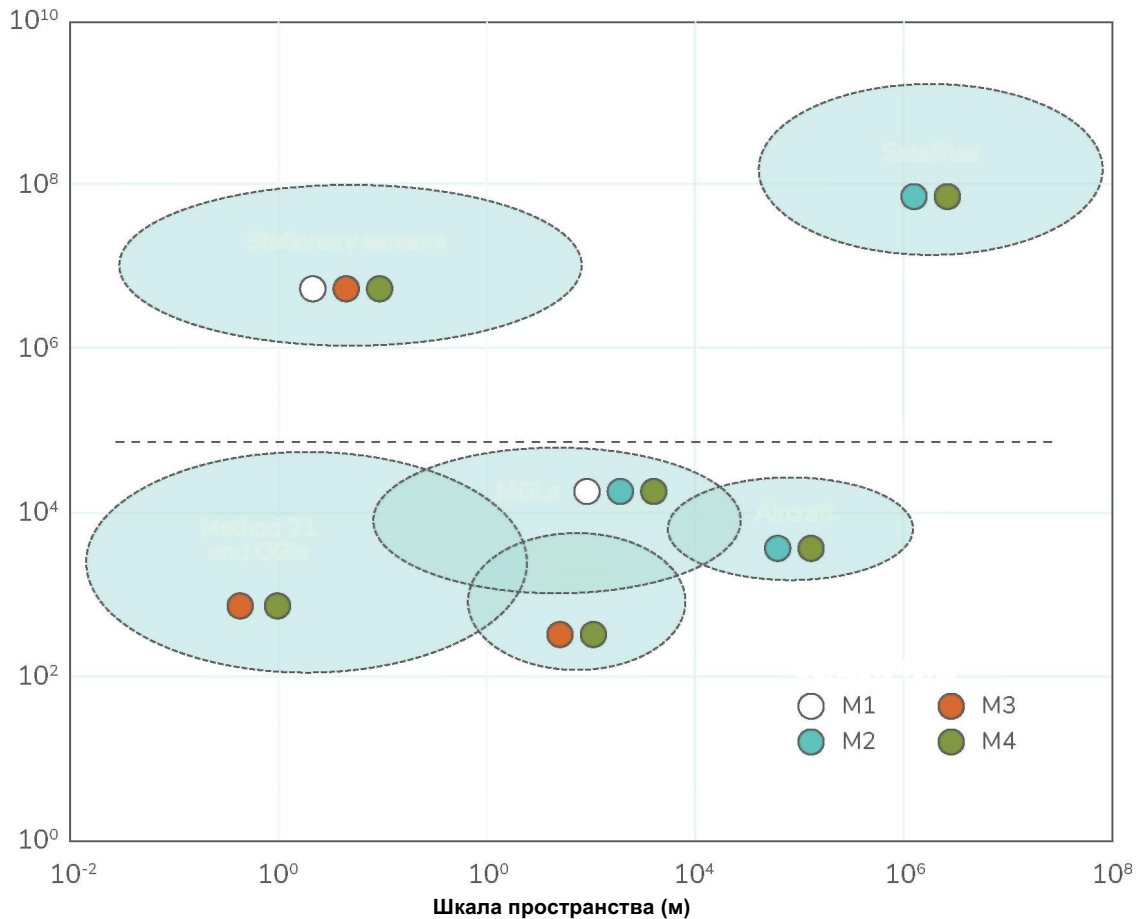
сокращению потребности в традиционных осмотрах для обнаружения утечек на всем оборудовании на всех площадках. Примерами альтернативных программ являются «непрерывный мониторинг пограничной линии» или программа, в которой для многоуровневого скрининга утечек используются регулярные осмотры с использованием технологий на уровне объекта. Например, вы можете использовать менее чувствительные аэросъемки или спутниковые съемки, которые проводятся чаще, с последующим осмотром, ограничивающимся отправкой команд только в те места, где обнаружены утечки.

Эти программы все еще находятся на стадии разработки и обсуждаются в статьях, как например статья Фокса и др. (2019)¹². Кроме того, проводятся исследования для сравнения новых альтернативных подходов с научной точки зрения. Примерами таких сравнений являются программа «Оценки эффективности управления неконтролируемыми выбросами» (FEMP EA) Канадского нефтяного альянса (RTAC), программа «Путь к эквивалентности» Университета Калгари и Колорадского университета, а также «Проблема мобильного мониторинга» Стэнфордского университета и Фонда Защиты Окружающей среды¹⁶.

Разработка и исследования, которые проводятся в настоящее время, направлены на то, чтобы найти и сравнить доступные методы обнаружения утечек, чтобы можно было применять наиболее точные и экономически эффективные методы или комбинации методов. Однако в настоящее время нет какой-либо определяющей информации, которую можно было бы использовать для сравнения экономической эффективности этих методов. Это может измениться в ближайшем будущем по мере развития программ, описанных в статье Фокса и др.

Продолжают появляться также новые технологии и методы обнаружения. Некоторые из них были предложены на коммерческой основе, а некоторые все еще находятся в пилотном тестировании. В последних отчетах предпринимались попытки каталогизировать различные технологии обнаружения (ITRC, 2018)¹¹. Некоторые технологии все еще находятся на стадии экспериментальной разработки, например, разработанная Агентством перспективных исследований Министерства энергетики США технология – Энергия (DOE ARPA-E), названная «Сети по наблюдению за метаном с использованием инновационных технологий для сокращения выбросов» (MONITOR).

Многие из технологий обнаружения предназначены для разных частот и с разными порогами обнаружения. В последних исследованиях сравнивались разные пространственные масштабы (минимальный размер области, которую можно проверить) с временным масштабом (частота наблюдений). На приведенной ниже диаграмме, взятой из статьи Фокса и др., 2019¹², показаны некоторые моменты этого сравнения.



Примечание: эти методы классифицируются также по их потенциальному использованию, показанному в цветных кругах, и фокусируются в основном на измерении выбросов во время разведочно-промысловой нефтегазовой деятельности:

- M1** = Разработка и уточнение коэффициентов выбросов для улучшения учета
- M2** = Оценка нисходящих выбросов из региона с несколькими источниками таких выбросов
- M3** = Обычный LDAR ближнего радиуса действия с использованием ручных инструментов
- M4** = Быстрый скрининг на аномальные выбросы

Недавние исследования различных методов указывают на то, что инновации в различных областях могут привести к повышению эффективности, скорости обнаружения и масштаба решений по мониторингу метана.

Где эта стратегия является уместной

Предполагается, что на любом наземном объекте с находящимся под давлением оборудованием можно сократить выбросы, вызванные неконтролируемыми утечками, следуя соответствующей альтернативной программе. Однако некоторым технологиям, которые оценивают выбросы на уровне объекта посредством моментального измерения, препятствуют другие выбросы в атмосферу, которые могут возникать во время сканирования, такие как выбросы при техническом обслуживании, стравливание жидкостей из газовых скважин или даже проскальзывание метана в выхлопе двигателя компрессора.

Поскольку эти программы все еще находятся в процессе разработки и тестирования, оператор, использующий их на добровольной основе, должен быть в курсе последних исследований эффективности этих методов.

Компания может также захотеть сфокусировать альтернативную программу на оборудовании и компонентах, которые могут производить самые большие выбросы. Например, производитель может отдавать предпочтение участкам с высоким дебитом добычи углеводородных жидкостей, а не участкам с сухим газом, поскольку на участках производства газа с большим содержанием бензинов наибольшее количество попутного газа будет выделяться из атмосферных резервуаров.

Заключение

Поскольку нет какой-либо определенной информации для сравнения экономической эффективности этих методов, оператору может понадобиться собрать соответствующую информацию. Это может быть препятствием для внедрения этих альтернативных программ до тех пор, пока не будет получено больше информации о пилотных испытаниях и текущих исследованиях.

Экономическая оценка любой меры по снижению утечек зависит от количества сокращенных или устраненных выбросов. Для конкретного объекта это обычно требует измерения или оценки скорости утечки по всем выявленным местам утечки в сравнении со стоимостью программы обнаружения и устранения. В некоторых случаях оператор может убедительно доказать эффективность альтернативной программы посредством своих измерений.

Стратегия по смягчению последствий 5: Замена компонентов, которые постоянно генерируют утечки

Считается, что неконтролируемые утечки в совокупности вносят существенный вклад в общие техногенные выбросы метана и могут быть снижены посредством выполнения программы по обнаружению и устранению утечек. Во всех случаях небольшая часть общего количества компонентов дает протечку. В некоторых случаях общая скорость утечки может быть обусловлена утечками из определенных типов компонентов. Если эти источники продолжают вызывать проблемы, повторяющиеся после того, как они были отремонтированы, или регулярно давать очень большие утечки, оператор может либо изменить тип компонента, либо даже удалить компонент, если это удаление, а также продолжение действия после удаления/замены можно выполнить безопасно.

Компоненты, которые имеют тенденцию к регулярной утечке, могут быть устранены при проектировании систем (см. Отдельное руководство по проектированию) или при модификации или адаптации существующего оборудования. Данное руководство касается только адаптации к существующему оборудованию.

Решение об устранении или замене определенных типов оборудования или компонентов обычно может быть принято из-за того, что осмотры для обнаружения и устранения выбросов показали, что компонент или оборудование постоянно дает утечку и вносит существенный вклад в выбросы.

Где эта стратегия является уместной

Предполагается, что любой наземный объект с оборудованием под давлением будет давать неконтролируемые утечки в течение срока службы. Вместе с тем, ожидается, что только на нескольких объектах будут обнаружены «проблемные компоненты», которые будут продолжать давать утечку после ремонта. Оператор должен отслеживать утечки и сохранять достаточно информации, чтобы знать тип и место утечки, чтобы иметь возможность найти источник повторяющихся утечек.

Приложение: подробная информация о стратегиях по смягчению последствий

Как только проблемный компонент идентифицирован, можно выполнить технический анализ, чтобы увидеть, можно ли заменить его другим типом компонента или полностью исключить. Ниже приведены некоторые примеры;

Тип источника	Вероятная замена или изменение	Вероятное устранение
Соединительное звено	Заменить соединительное звено, например, заменив старое соединение новым.	Сварная труба без соединительного звена.
Клапан	Перейти на другой тип клапана или на другой тип уплотнения в том же клапане.	Устранение клапана.
Линии с незамкнутыми концами	Добавить дополнительный запорный клапан, чтобы на выходе в атмосферу находился «двойной запорный клапан». Поставить на линию с незамкнутым концом заглушку или крышку на резьбе.	Направить к контрольному устройству или на факел, или устранить линию с незамкнутым концом, если она не нужна для каких-либо производственных целей.
Клапаны сброса давления	Изменить тип клапана сброса давления или добавить разрывную пластину.	Заменить клапан сброса давления альтернативным устройством сброса (таким как разрывная пластина) или, если возможно, направить клапан сброса давления в систему управления, а не в атмосферу.
Замерные люки	Заменить на замерные люки другого типа.	Заменить резервуары под давлением или перейти на проектное решение без резервуаров на кустовых площадках.
Уплотнения компрессоров	Заменить уплотнения на другой тип или добавить устройство газового контроля уплотнителей.	Удалить компрессор.

Очень важно отметить, что удаление компонентов в качестве адаптации к существующему оборудованию, вероятно, потребует проведения анализа Управления Изменениями, чтобы удостовериться, что компонент не нужен в производстве, и что его удаление не окажет неблагоприятного влияния на безопасность оборудования или производства. В большинстве случаев это предотвратит простое удаление компонента, поскольку при первоначальной установке ожидалось, что он будет иметь важное назначение.

Список литературы

- 1 Агентство США по охране окружающей среды (US EPA) Программа отчетности по парниковым газам на 2017 год. Промышленный профиль: Системы нефти и природного газа, октябрь 2018 г.
- 2 Агентство по охране окружающей среды США «Перечень США по выбросам и утечкам парниковых газов, 1990-2017», апрель 2019 г.
- 3 Канадская ассоциация производителей нефти (CAPP) «Обновление коэффициентов неорганизованной утечки из оборудования», Канадская ассоциация производителей нефти (CAPP), компания Clearstone Engineering Ltdm, февраль 2014 г.
www.capp.ca/publications-and-statistics/publications/238773
- 4 Научно-исследовательский институт газа, Агентство по охране окружающей среды США, «Выбросы метана в газовой промышленности. Том 8: Утечки из оборудования, июнь 1996 г.
- 5 Агентство по охране окружающей среды США «Обнаружение и устранение утечек, Руководство по передовому опыту», октябрь 1999 г.
- 6 Британский институт стандартизации «Неконтролируемые и диффузные выбросы, являющиеся общей проблемой промышленного сектора. Измерение неконтролируемого выброса паров, образующихся в результате утечек из оборудования и трубопроводов (Британский стандарт)», BS EN 15446, британский (и европейский) стандарт по обнаружению утечек
- 7 Коалиция «Климат и чистый воздух» (CCAC), Нефтегазовое партнерство по метану (OGMP) «Техническое руководство № 2: Утечки из компонентов и оборудования», обновлено в марте 2017 г.
- 8 Агентство США по охране окружающей среды, программа Natural Gas Star «Рекомендуемые технологии для сокращения выбросов метана»
www.epa.gov/natural-gas-star-program/
- 9 Европейская экономическая комиссия ООН (UNECE), «Руководство по передовому опыту в области управления метаном в нефтегазовом секторе», проект, март 2019 г.
- 10 Фокс и др. Обзор технологий ближнего радиуса действия и экранирования для снижения неорганизованных выбросов метана при добыче нефти и газа, Environmental research Letters, июль 2019 г.
- 11 Межгосударственный Совет по Технологическому Регулированию «Оценка инновационных технологий обнаружения метана», сентябрь 2018 г.
- 12 Фокс и др. Система эквивалентного сокращения выбросов метана для альтернативных программ обнаружения и устранения утечек, Elementa, 2019 г.,
www.doi.org/10.1525/elementa.369
- 13 Лэмб и др. Прямые измерения показывают снижение выбросов метана из локальных систем распределения природного газа в США, Environ Sci Technol 49 (8): 5161–5169 doi: 10.1021/es505116p, 2015
- 14 Зиммерле и др., Выбросы метана из системы транспортировки и хранения природного газа в Соединенных Штатах. Environ Sci Technol 49 (15): 9374–9383 doi: 10.1021/acs.est.5b01669, 2015
- 15 Р. Брандт, Г. А. Хит, Д. Кули, «Утечки метана из систем распределения природного газа в результате экстремального газоснабжения» Environ Sci Technol, в печати doi: 10.1021/acs.est.6b04303, октябрь 2016 г.
- 16 Арвинд Равикумар и др. Технологии обнаружения метана в режиме слепого сравнительного анализа – результаты исследования мобильного мониторинга в Стэнфорде/EDF, Elementa, 2019



METHANE
GUIDING
PRINCIPLES