

# Метод количественной оценки скорости утечки (LRQ) для камер акустической визуализации

Торос Сенан,  
К.т.н. Инженер по акустическим исследованиям

## Введение

Обнаружение утечек необходимо для обеспечения бесперебойной работы многих систем. К наиболее известным относятся системы сжатого воздуха, которые используются во многих областях и чаще всего на производственных предприятиях.

## Напоминание о работе ii900/ii910

Модель ii900/ii910 использует 64 микрофона, которые расположены определенным образом в массиве. В центре массива находится камера видимого диапазона, которая позволяет получить изображение участка. Это устройство использует сложные алгоритмы, чтобы создать карту звука или акустическое изображение источников звука, а затем накладывает созданную карту звука на изображение. В зависимости от положения источника звука относительно поля зрения ii900/ii910 звук воспринимается каждым микрофоном через разное время. Разница во времени между микрофонами позволяет определить положение источника звука: Если звук поступает с правой стороны устройства, микрофоны с правой стороны массива воспринимают звук на долю секунды раньше, чем микрофоны с левой стороны. В правой части экрана ii900/ii910 появится изображение этого звука.

## Как модель ii900/ii910 обнаруживает утечки?

При возникновении утечки в системе, находящейся под давлением, молекулы выходящего газа (воздуха) создают турбулентность, которая вызывает быстрые изменения давления и скорости потока. Эти изменения могут передаваться в виде звуковых волн. Модель ii900/ii910 способна определять местоположение и интенсивность этих звуковых волн.

Сжатый воздух, вытекающий в окружающую среду, создает широкополосный шум — как в слышимом, так и в ультразвуковом диапазоне частот (Eret and Meskell, 2012; Holstein et al., 2016). В промышленных системах сжатого воздуха для обнаружения утечек активно используются узкополосные (с центром около 40 кГц) ультразвуковые датчики. Однако применение узкополосного ультразвукового датчика накладывает ряд ограничений.

Расстояние между местом утечки и измерительным устройством, а также угол измерения оказывают значительное влияние на эффективность ультразвуковых датчиков: Во-первых, высокочастотный звук быстро ослабляется при поглощении в атмосфере (см. Wolstencroft and Neale, 2008).

Во-вторых, уровень звукового давления, создаваемого утечкой сжатого воздуха, изменяется в зависимости от угла измерения (Wolstencroft and Neale, 2008). Также известно, что шумные среды снижают производительность узкополосных ультразвуковых датчиков (Eret and Meskell, 2012). Применение широкополосных датчиков, работающих как в звуковом, так и в ультразвуковом диапазоне частот, дает пользователю возможность компенсировать указанные выше ограничения. Предлагаемая гибкость в частотном диапазоне повышает надежность системы обнаружения утечек. Например, на рис. 1 видно, что утечка сжатого воздуха из открытого отверстия под давлением в системе 6 бар создает широкополосный шум. На рис. 1 показано, что область частот с максимальным измеренным уровнем звукового давления находится в пределах звукового диапазона. В противоположность этому, уровень звукового давления, измеренный в диапазоне частот 35–45 кГц (красные пунктирные линии на рис. 1), заметно ниже, чем остальной частотный спектр.



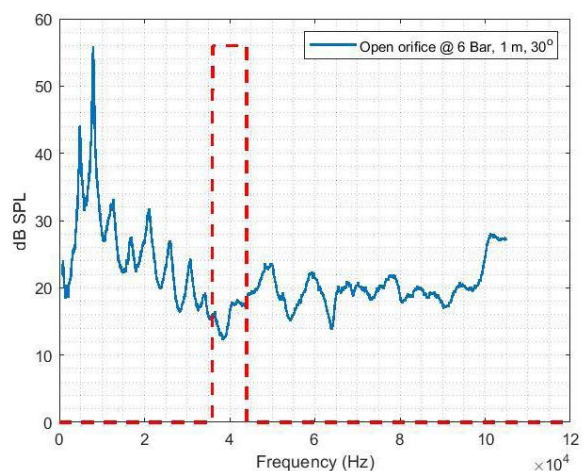


Рис. 1. Утечка сжатого воздуха через открытое отверстие (1/4 дюйма). Измерение производится с помощью i910 на расстоянии 1 м от источника утечки с углом измерения 30 градусов. Синей линией обозначен сглаженный спектр, а красной пунктирной линией обозначена частотная область около 40 кГц.

Проводились некоторые исследования, посвященные изучению частотных характеристик звуков утечки сжатого воздуха. В исследовании Holstein et al. (2016) были представлены частотные спектры измерений утечки сжатого воздуха с систематическим увеличением расхода (см. рис. 2 в Holstein et al., 2016). В качестве источника утечки использовалось открытое круглое отверстие, измерения проводились на расстоянии 20 см от источника. Частотные спектры показывают, что с увеличением расхода увеличивается энергия в диапазоне свыше 50 кГц. Для наибольшего расхода, измеренного в эксперименте, пик частотного спектра находится около 80 кГц.

### Факторы, влияющие на обнаружение утечек

Факторы, влияющие на обнаружение утечек, рассмотрены отдельно в данном разделе. Следует отметить, что факторы, описанные в данном разделе, взаимодействуют друг с другом и должны рассматриваться в виде отдельных компонентов большого сложного явления.

#### Факторы источника утечки:

##### 1. Давление в системе

Как правило, чем выше давление в системе, тем больше утечка, что приводит к более высокой интенсивности звука, упрощая обнаружение.

##### 2. Расход

Аналогично давлению, чем выше расход в системе, тем больше утечка, что приводит к более высокой интенсивности звука, измеряемой в месте утечки. Повышенная интенсивность звука облегчает процесс акустического обнаружения.

### 3. Размер и форма отверстия

Размер и форма отверстия должны учитываться вместе. Если рассматривать широкий спектр потенциальных утечек воздуха, достаточно сложно дать универсальные рекомендации, связанные с влиянием формы и размера на обнаружение утечек. В данном списке показаны некоторые возможные источники утечки. Размеры и форма отверстия различаются для каждого элемента в списке Воздушных шлангов, а также соединений и муфт воздушных шлангов

- Изношенные соединения или соединения без уплотнительных колец
- Неправильно установленные фильтры, смазочные устройства и регуляторы
- Открытые системы продувки
- Открытые конденсатные ловушки
- Плохо отремонтированные сливные каналы или сливные каналы с утечками
- Некачественные или неправильно нанесенные резьбовые герметики
- Регулирующие или запорные клапаны
- Изношенные уплотнения или прокладки
  - Старые или плохо обслуживаемые пневматические инструменты
  - Простаивающий или неиспользуемый станок или производственное оборудование с подачей воздуха

Газ	Формула	ρ <sub>0</sub> (кг/м <sup>3</sup> )
Ацетилен	C <sup>2</sup> H <sup>2</sup>	1,173
Воздух	–	1,2929
Аммиак	NH <sup>3</sup>	0,7710
Аргон	A	1,7837
Углекислый газ	CO <sup>2</sup>	1,977
Моноксид углерода	CO	1,250
Хлор	Cl <sup>2</sup>	3,214
Этан (10 °C)	C <sup>2</sup> H <sup>6</sup>	1,356
Этилен	C <sup>2</sup> H <sup>4</sup>	1,260
Гелий	He	0,1785
Водород	H <sup>2</sup>	0,0899
Сероводород	H <sup>2</sup> S	1,539
Метан	CH <sup>4</sup>	0,7168
Неон	Ne	0,9003
Оксид азота (10 °C)	NO	1,34
Азот	N <sup>2</sup>	1,2506
Закись азота	N <sup>2</sup> O	1,977
Кислород	O <sup>2</sup>	1,429
Пропан	C <sup>3</sup> H <sup>8</sup>	2,9009
Диоксид серы	SO <sup>2</sup>	2,927
Пар (100 °C)	H <sup>2</sup> O	0,598
Гексафторид серы**	SF <sup>6</sup>	6,17
Хладагент R134a*	CH <sup>2</sup> FCF <sup>3</sup>	14,433

Таблица 1. Список значений плотности для газов. Плотность газа, ρ<sub>0</sub>, при 0 °C 1ATM\*

\*Handbook of Chemistry and Physics. 48th ed.

\*\*[https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur\\_hexafluoride](https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_hexafluoride)

\*\*\*[https://www.engineeringtoolbox.com/r134a-properties-d\\_1682.html](https://www.engineeringtoolbox.com/r134a-properties-d_1682.html)

## Свойства жидкости

Свойства жидкости влияют на звук, генерируемый при выходе из отверстия утечки.

### 4. Плотность

В таблице ниже указана плотность газов в кг/м<sup>3</sup> при 0 °C и одинаковом атмосферном давлении. Плотность газа влияет на интенсивность звука утечки. Например, низкая плотность гелия означает, что уровни звукового давления, измеренные в месте утечки, будут ниже по сравнению со сжатым воздухом при том же расходе и давлении. Практический опыт подтверждает, что обнаружить утечку гелия достаточно сложно.

### 5. Вязкость

Вязкость газа влияет на уровень звукового давления в месте утечки. Однако его влияние будет меньше, чем у плотности.

### 6. Температура окружающей среды

Необходимо учитывать температуру окружающей среды как в источнике утечки, так и в трубопроводе. Для источника утечки температура окружающей среды влияет на плотность и вязкость. Оба этих фактора влияют на уровень звукового давления в месте утечки. По мере повышения температуры окружающей среды кинетическая энергия молекул увеличивается, что приводит к увеличению интенсивности звука в месте утечки.

### 7. Давление окружающей среды

Давление окружающей среды будет иметь прямое отношение к плотности газа. Снижение давления окружающей среды приведет к уменьшению плотности, что снизит интенсивность звука в месте утечки.

### 8. Расстояние от места утечки до камеры

Расстояние измерения влияет на измеренный уровень звукового давления. Поскольку звук распространяется во всех направлениях от источника, его интенсивность с расстоянием уменьшается.

### 9. Температура окружающей среды

Изменения температуры окружающей среды могут повлиять на изменение как плотности газов, так и их вязкости. В свою очередь, оба этих фактора влияют на скорость звука при его прохождении через среду. При повышении температуры звук движется быстрее. Изменение температуры окружающей среды является одним из механизмов, влияющих на количество акустической энергии, поглощаемой атмосферой. Для низких частот и малых расстояний влияние температуры на поглощение воздуха незначительно (Harris, 1966). Однако для очень высоких частот и больших расстояний уровень звукового давления можно заметно снизить (Vladišauskas and Jakevičius, 2004).

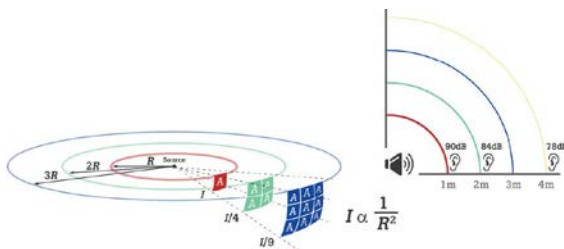
### 10. Влажность

Второй механизм, влияющий на уровень звукового давления из-за поглощения воздуха, — это влажность. Как и в случае с влиянием температуры окружающей среды, при нормальных условиях влияние влажности на уровень звукового давления незначительно (Harris, 1966). Воздействие заметно для очень высоких частот и высокого уровня влажности (Vladišauskas and Jakevičius, 2004).

### 11. Давление окружающей среды

Давление окружающей среды не влияет на уровень звукового давления в идеальном газе, поскольку плотность воздуха и давление газа имеют схожее, но обратное влияние на скорость звука. Оба влияния компенсируют друг друга. Поэтому никакой разницы между уровнем звукового давления в месте утечки и в месте измерения из-за давления окружающей среды не ожидается.

## Path factors and atmospheric effects



Если увеличить в два раза расстояние между источником звука и положением измерения в свободном поле, интенсивность звука уменьшится на 6 дБ.

## Какие свойства утечки измеряет прибор ii900/ii910?

Прибор Ii900/ii910 выявляет тип утечки и оценивает расход утечки на основе акустического входа. Был разработан и проведен ряд лабораторных экспериментов для создания алгоритмов классификации типа утечки и прогнозирования расхода.



## Классификация типов утечки в ii900/ii910

Модели ii900 и ii910 классифицируют зарегистрированные акустические данные утечки в зависимости от того, где она возникает: Шланг, открытый конец, быстроразъемное соединение и резьбовое соединение. Четыре классификации, четыре типа утечек, были установлены на конце системы трубопроводов сжатого воздуха, а акустические измерения проводились в полубезэховой камере. Два примера экспериментальной настройки представлены на рис. 3 и рис. 4. Фитинги, которые сформировали четыре условия утечки для эксперимента, показаны на рис. 5.

1. **Шланг:** Шланг представляет собой гибкую трубку, которую можно легко установить. Однако, в отличие от металлических и латунных труб, этот материал является более чувствительным. Следовательно, в шлангах, соединяющих воздушный компрессор с пневматическими устройствами, легко образуются специфические прорезы и отверстия. Для сбора акустических данных утечки в шланге для классификации и прогнозирования расхода была использована утечка из разрезного шланга (рис. 3 и рис. 5а).
2. **Открытый конец:** Трубка с открытым концом или открытое отверстие — наиболее распространенный тип утечки, используемый в научных исследованиях (справочных материалах). Это происходит в том случае, когда часть трубопровода системы подачи сжатого воздуха остается открытой. Трубка с открытым концом использовалась в экспериментах по классификации и прогнозированию расхода на протяжении всего этапа разработки ii900 (рис. 4 и рис. 5b).
3. **Быстроразъемное соединение:** Быстроразъемные фитинги, также известные как быстроразъемные муфты, обеспечивают простое и быстрое соединение. Быстроразъемные фитинги опираются на наклонные поверхности, которые скользят в одном направлении, и устойчивы к продвижению в противоположном направлении. Обычно повреждение возникает на одном или нескольких внутренних наклонных элементах, и сжатый воздух просачивается через быстроразъемный фитинг. Воздух рассеивается вокруг фитинга, и направление утечки сжатого воздуха меняется для каждого случая деформации. Деформированный быстроразъемный фитинг использовался для акустических измерений при разработке алгоритмов классификации и прогнозирования расхода ii900/ii910 (рис. 5c).
4. **Резьбовая муфта:** Обычно для конечных точек системы сжатого воздуха используют резьбовую торцевую крышку. Резьбовые торцевые крышки должны быть аккуратно размещены и правильно отрегулированы в зависимости от количества витков резьбы, которые должны войти в концевую трубку. Иногда инженеры могут ослабить эти концевые секции. Более того, при многократном использовании резьбовые торцевые крышки могут деформироваться. В таких случаях сжатый воздух просачивается через торцевую крышку, что снижает эффективность системы. Свободно расположенная резьбовая торцевая крышка использовалась в экспериментах в качестве источника утечки (рис. 5d).



Рис. 3. Измерение утечки в шланге под углом 30 градусов.

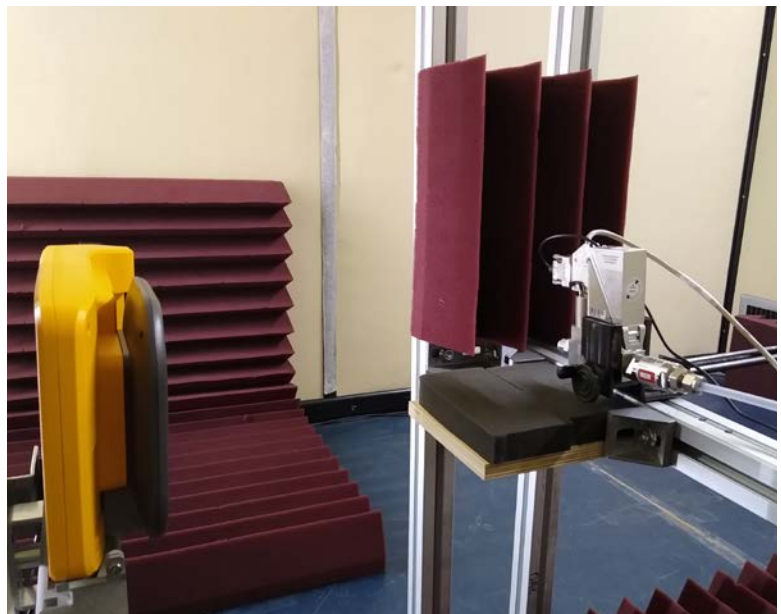


Рис. 4. Экспериментальная настройка измерения утечки в открытом конце под углом 90 градусов.



Рис. 5. Четыре типа утечек, которые были исследованы во время экспериментов: шланг (а), открытый конец (b), быстроразъемное соединение (c) и резьбовое соединение (d).

## Индекс количественной оценки скорости утечки

Устройство Ii900/i910 обеспечивает оценку расхода в месте утечки на основе записанных акустических данных. Алгоритмы расхода были разработаны на основе результатов лабораторных измерений, которые проводились в полубезэховой камере. Поскольку акустические характеристики каждого типа утечки различаются, для каждого типа утечки существует отдельный алгоритм прогнозирования расхода. Поэтому алгоритмы оценки расхода применяются после этапа классификации.

Затем прогнозируемый расход для данного типа утечки преобразуется в индекс количественной оценки скорости утечки (LRQ). LRQ принимает значение от 0 до 10. Более высокое значение LRQ указывает на больший расход в месте утечки и может рассматриваться как рекомендация для ремонта.

## Выводы

Устройство Ii900/i910 обеспечивает эффективный частотный диапазон и представляет собой удобное в использовании портативное устройство, которое пытается компенсировать сложности, связанные с обнаружением и количественной оценкой утечек. Функция LRQ очень важна для поддержания эффективности системы сжатого воздуха, а функции создания отчетов повышают скорость взаимодействия между инженерами по техническому обслуживанию.

## Список литературы

- Eret, P., & Meskell, C. (2012). Microphone arrays as a leakage detection tool in industrial compressed air systems. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012.
- Harris, C. M. (1966). Absorption of sound in air versus humidity and temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 40(1), 148-159.
- Holstein, P., Barth, M., & Probst, C. (2016). Acoustic methods for leak detection and tightness testing. In *Proceedings, 19th World Conference on Non-Destructive Testing* (pp. 13-17).
- Vladišauskas, A., & Jakevičius, L. (2004). Absorption of ultrasonic waves in air. *Ultragarsas*, 50(1), 46-49.
- Wolstencroft, H., & Neale, J. (2008). Characterisation of compressed air leaks using airborne ultrasound. *Proceedings of Acoustics (AAS'08)*.

**Fluke.** *Keeping your world up and running.*®

ООО «Флюк СИАЙЭС»  
125993, г. Москва, Ленинградский  
проспект д. 37 к. 9 подъезд 4, 1 этаж,  
БЦ «Аэростар»  
Тел: +7 (495) 664-75-12  
Факс: +7 (495) 664-75-12  
e-mail: info@fluke.ru

© Авторское право 2020-2021 Fluke Corporation.  
Авторские права защищены. Данные могут быть  
изменены без уведомления. Самые надежные  
инструменты в мире 06/2021 210581-ru

Не разрешается вносить изменения в данный  
документ без письменного согласия компании  
Fluke Corporation.