

# Модель утечки газа для расчета интенсивности потока газа, детектируемого системой ДЛС-КС

О.В. Ершов  
Pergam R&D

Модель основана на базовых физических принципах утечки газа в реальных полевых условиях, а также на многолетнем опыте работы с системами ALMA, SELMA поиска утечек газа. Окончательное уравнение для вычисления оценки интенсивности газового потока получено с применением реальных результатов. Уравнение проверено при помощи многочисленных данных, полученных при испытаниях ALMA в RMTC (Rocky Mountain Test Center, Wyoming, USA) в 2016.

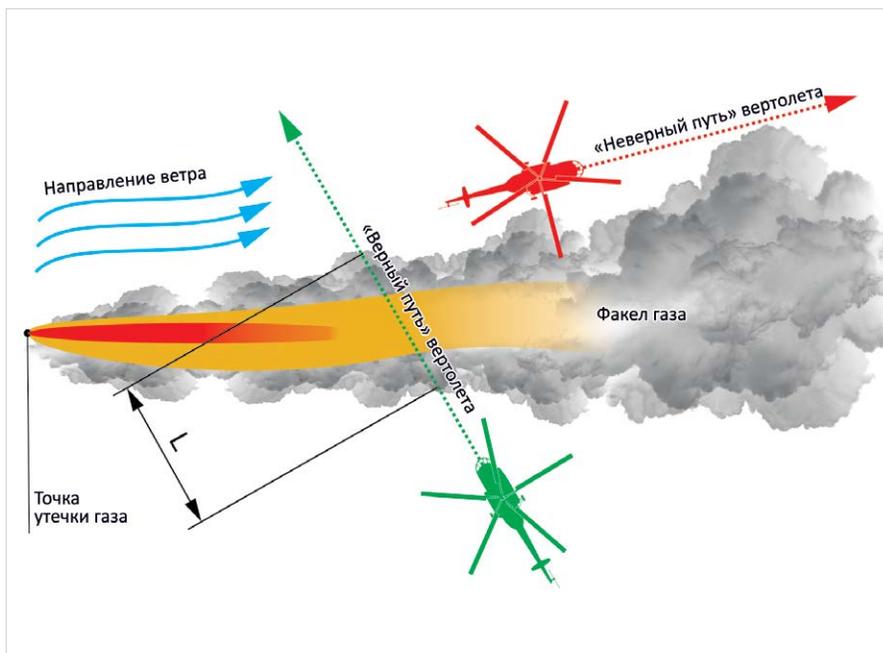


Рис. 1 — Типичный плюмаж газ

Полевые испытания в RMTC включали 15 точек искусственной утечки газа. Администрация Центра испытаний установила различные интенсивности потока газа в широком диапазоне от 6 до 5000 SCFH (стандартных кубических футов в час). Значения интенсивности потока газа изменялись 2 раза в каждый день испытаний. Вертолет с системой ALMA перемещался вдоль всех точек искусственной утечки газа по 3 раза для каждого набора интенсивностей потока газа. Общее время испытаний системы ALMA составило 3 рабочих дня. В течение этих испытаний ALMA обнаружила примерно 180 утечек газа. От организаторов испытаний нами получены данные по интенсивности потока газа для каждого значения в каждой точке утечки. Кроме того, мы получили данные о скорости ветра во время всех трех дней полетов. Данные ALMA предоставляют всю необходимую информацию о параметрах всех детектированных облаков газа. В результате получены многочисленные статистические данные для проверки указанной экспериментальной модели утечек газа.

Газ, выпущенный в точке утечки, движется вдоль направления ветра. В результате облако газа имеет форму факела, как показано на рис. 1. Концентрация газа (в единицах ppm) показана красным и оранжевым цветами на этом рисунке. Видно, что при движении от точки утечки: (1) концентрация газа понижается и (2) облако газа расширяется. При движении вертолета с системой ALMA (или другим дистанционным детектором газа) над факелом газа лазерный луч системы ALMA пересекает облако газа в течение некоторого времени.

ALMA измеряет концентрацию газа в единицах ppm·m (как и все остальные

дистанционные детекторы газа, в т.ч. ДЛС-КС). Концентрация газа в этих единицах слабо зависит от расстояния между точкой утечки и местом измерения в плюмаже газа (в то время как концентрация газа в единицах ppm значительно изменяется вдоль факела).

На этом факте основано 1-е положение модели факела газа: измеряемое значение концентрации газа в единицах ppm·m пропорционально интенсивности потока в источнике газа. Однако это положение справедливо только для «верного» пути вертолета (см. рис. 1).

Типичный график измеряемой концентрации газа во время полета вдоль

«верного» пути вертолета показан на рис. 2. Этот график был получен системой ALMA G1 во время испытаний в RMTC в 2016 г. Отметим, время измерения системой ALMA G1 составляло: 0,5 с при медленных измерениях и 0,1 с при быстрых измерениях. Из рис. 2 видно, что для данного детектированного выстуга при детектировании утечки газа: (1) максимальная концентрация газа при медленных измерениях 1000 ppm·m, (2) максимальная концентрация газа при быстрых измерениях 2000 ppm·m, (3) продолжительность пика утечки была 1,1 с (в соответствии с быстрыми измерениями). Проверено, что во время этого

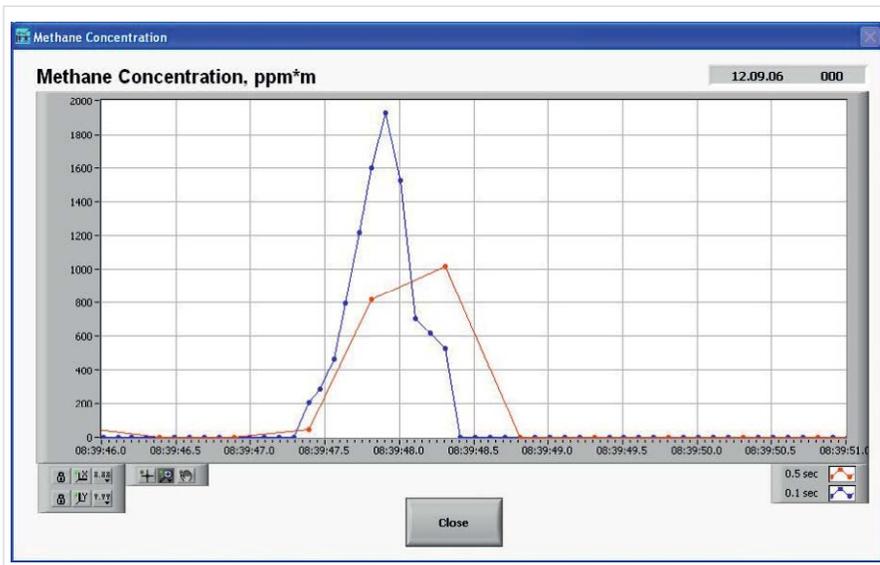


Рис. 2 — Типичная форма пика измеряемой концентрации при детектировании облака газа

детектирования скорость вертолета равнялась 26 м/с. Таким образом, длина L полета, пересекающего факел газа (см. рис. 1) составляла 28,6 метров, или 94 фута.

2-е положение модели факела газа: расстояние L также пропорционально интенсивности потока газа.

Введем значение произведения P, пропорциональное интенсивности потока газа F (в единицах SCFH, или в других единицах, например, мегаграмм в год):

$$P = C \cdot \tau \cdot V \cdot W^2 \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где:

C — максимальная концентрация газа в единицах ppm·m в соответствии с медленными измерениями;

$\tau$  — длительность пика в с на графике концентрации газа при быстрых измерениях;

V — скорость вертолета во время детектирования газа в м/с;

W — скорость ветра во время детектирования газа в единицах «узел» (миль в час).

Замечание. Уравнение (1) содержит корреляционный множитель  $W^2$ . Применение этого множителя основано на многолетнем опыте работы с системой ALMA при различных скоростях ветра. Например, если скорость ветра W увеличивается в 2 раза, то максимальная концентрация газа C уменьшается в 2 раза, а продолжительность  $\tau$  (или расстояние L) также уменьшается в 2 раза.

3-е положение модели факела газа: используется калибровочный множитель  $W^2$ .

Произведение P вычислено для всех 180 детектированных газа во время испытаний системы ALMA в RMTC в 2016 г. Значения интенсивности потока газа F (в единицах SCFH, стандартных кубических футов в час) были получены для каждой искусственной утечки газа в RMTC от организаторов испытаний. Экспериментальные данные зависимости P от F показаны на графике на рис. 3 (черные точки).

Из графика на рис. 3 видно, что данные измерений системой ALMA рассчитанного значения P были различны при многократных пролетах вертолета около точки утечки газа с одной и той же интенсивностью потока газа. Это типичная ситуация для измерений концентрации газа в окрестности любой утечки газа: все последовательные измерения с вертолета дают разные результаты. Такая неопределенность имеет много причин. Тем не менее, из графика на рис. 3 видно, что имеет место корреляция между рассчитанным значением P и интенсивностью потока газа F. Эта корреляция становится все более выражена с увеличением количества экспериментальных данных, как это было при испытаниях в RMTC в 2016 г. Корреляционное уравнение между P и F выведено по правилам математической статистики. Уравнение имеет вид:

$$P = 0.0022 \cdot F, \quad (2)$$

где F измерено в единицах SCFH, а P вычислено в единицах, которые перечислены в комментариях к уравнению (1). Результат, в соответствии с уравнением (2), представлен на графике на рис. 3 (красная линия).

Итак, алгоритм применения этой модели плюмажа газа следующий: сначала вычислить

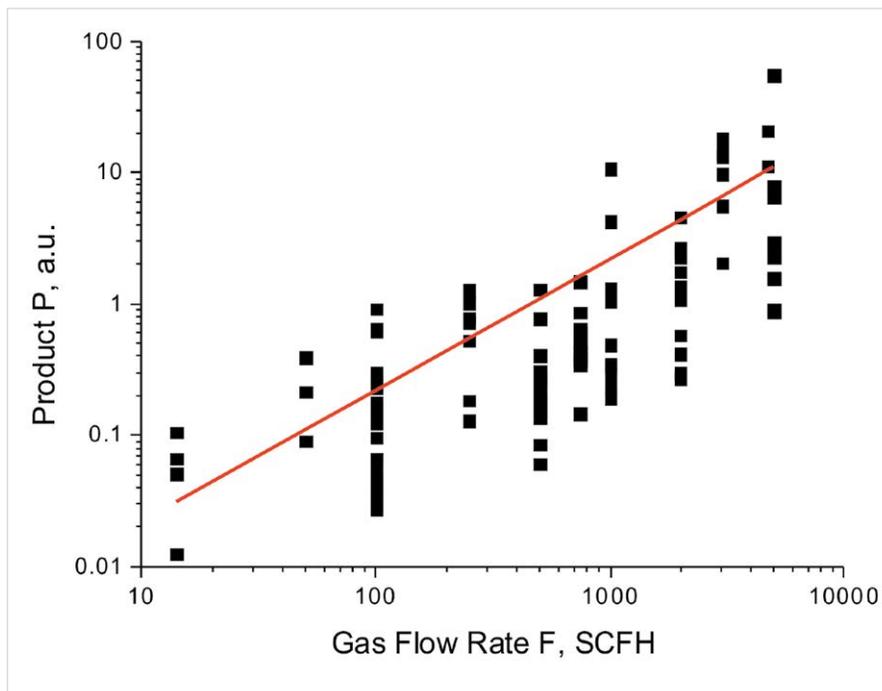


Рис. 3 — Данные испытаний в RMTC (черные точки) и аппроксимирующая прямая (красная)

значение P на основе экспериментальных данных, затем вычислить интенсивность потока газа F согласно уравнению:

$$F \text{ (SCFH)} = 455 \cdot P \quad (3)$$

Для примера вычислим интенсивность потока газа для детектирования, показанного на рис. 2:

$$C = 1000 \text{ ppm}\cdot\text{m}; \tau = 1,1 \text{ с};$$

$$V = 26 \text{ м/с}; W = 7 \text{ узлов}$$

Согласно уравнениям (1) и (3) получаем:

$$F = 638 \text{ SCFH}$$

Реальная интенсивность потока газа в этой точке искусственной утечки была 1000 SCFH.

На наш взгляд, это приемлемое соответствие рассчитанного значения реальным данным, с учетом рассеяния результатов измерений, которое видно на рис. 3.

Комментарии: 1) Понятно, что мы можем получить только приближенную оценку интенсивности потока газа в соответствии с процедурой, основанной на уравнениях (1) и (3), с учетом разброса данных при последовательных измерениях одной и той же утечки газа. Поэтому важно сделать многочисленные пролеты вертолета с системой ALMA окрестности детектируемой утечки газа, чтобы получить лучшую точность оценки интенсивности потока газа. Система ДЛС-КС пересекает облако многократно.

2) Если надо получить оценку интенсивности потока газа в других единицах измерения, например, в мегаграмм в год, то с учетом веса одного стандартного кубического фута метана при нормальных условиях в 18,4 грамм, получаем: 1 куб. фут/час =  $18,4 \cdot 24 \cdot 365 = 0,16$  мегаграмм в год. В результате уравнение (3) преобразуется к виду:

$$F \text{ (мегаграмм в год)} = 2800 \cdot P \quad (4)$$

Процедура оценки интенсивности потока газа системой ДЛС-КС:

Рекомендуется следующая процедура измерения.

Онлайн:

1. Сделать несколько детекций (минимум 5) лазером ДЛС-КС факела газа из точки утечки.
2. Для каждой детекции факела измерить скорость ветра на поверхности грунта.

Оффлайн:

3. Запустить программу обработки данных GLD Process для данных измерения при детектировании данной утечки газа.
4. Создать документ Excel и заполнить следующие столбцы для каждого детектирования газа:
  - 4.1. Максимальная концентрация газа при медленных измерениях в единицах ppm·m;
  - 4.2. Продолжительность детектирования газа в с. при быстрых измерениях;
  - 4.3. Скорость сканирования ДЛС-КС;
  - 4.4. Скорость ветра в единицах «узел».
5. Вычислить значение P по уравнению (1) для каждого детектирования, т.е. для каждой строки.
6. Исключить две строки с минимальным и максимальным значениями P.
7. Вычислить среднее значение P по оставшимся строкам.
8. Вычислить приближенное значение интенсивности потока газа по уравнению (3) в единицах куб. фут/час, или по уравнению (4) в единицах мегаграмм в год.

Pergam R&D



+7 495 775-75-25  
neverov@pergam.ru  
www.pergam-rd.ru