

Сравнительная оценка погрешности сепарационного и разностного методов измерения расхода и компонентного состава продукции скважин

В.И. Чудин, О.В. Жилияев, Ю.Б. Савленков

В настоящее время применяются различные схемы измерения расхода и компонентного состава газожидкостного потока. Одна из наиболее распространенных – с использованием сепаратора. При помощи сепаратора газожидкостный поток разделяется на две составляющие – газ и жидкость, но не всегда это разделение проходит идеально. К факторам, снижающим качество сепарирования, относятся:

- недостаточное время нахождения смеси в сепараторе;
- высокое давление в сепараторе;
- неблагоприятные температурные условия.

Рассмотрим схему представленную на рисунке 1.

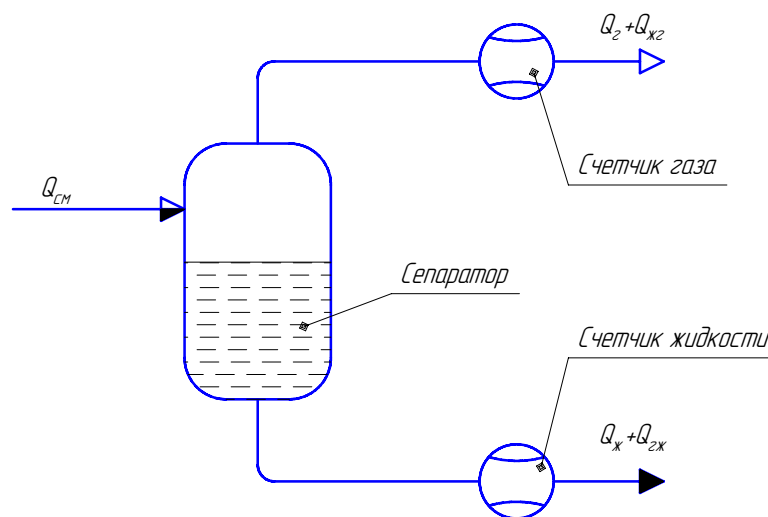


Рисунок 1

Пусть на вход сепаратора подается смесь с объемным расходом $Q_{см}$. С учетом выше изложенных факторов на выходе из сепаратора имеем:

- по жидкостной линии объемный расход жидкости $Q_{ж}$ и объемный расход газа, унесенного жидкостью $Q_{гж}$;
- по газовой линии объемный расход газа $Q_{г}$ и объемный расход жидкости, унесенной газом $Q_{жг}$.

На жидкостной линии установлен счетчик жидкости, а на газовой соответственно счетчик газа. Допустим, оба счетчика обладают идеальной избирательностью, то есть счетчик жидкости измеряет только $Q_{ж}$, а счетчик газа только $Q_{г}$. Инструментальную погрешность измерительных приборов примем пренебрежимо малой.

Проведем оценку методической погрешности, обусловленной неполной сепарацией газа и уносом жидкости в газовую линию.

Коэффициент сепарации β равен:

$$\beta = \frac{Q_{ж}}{Q_{ж} + Q_{гж}} \quad (1)$$

Коэффициент сепарации определяет долю жидкости в газожидкостной смеси, проходящей по жидкостной линии.

Коэффициент уноса жидкости газом:

$$\gamma = \frac{Q_{жг}}{Q_g + Q_{жг}} \quad (2)$$

Коэффициент уноса определяет объемную долю жидкости в газожидкостной смеси, проходящей по газовой линии.

Из (1) и (2) получаем:

$$Q_{гж} = Q_{жс} \frac{1-\beta}{\beta}, Q_{жг} = Q_g \frac{\gamma}{1-\gamma} \quad (3)$$

Запишем выражение для полного расхода газа.

$$Q_{го} = Q_g + Q_{гж} = Q_g + Q_{жс} \frac{1-\beta}{\beta} \quad (4)$$

Поскольку счетчик газа установлен на газовой линии, слагаемое $Q_{жс} \frac{1-\beta}{\beta}$ оказывается неучтенным и составляет методическую погрешность измерения расхода газа.

Абсолютная погрешность измерения газа:

$$\Delta Q_g = Q_g^{изм} - Q_{го} = Q_g - (Q_g + Q_{жс} \frac{1-\beta}{\beta}) = -Q_{жс} \frac{1-\beta}{\beta} \quad (5)$$

где $Q_g^{изм}$ — показания счетчика газа.

Относительная погрешность измерения газа:

$$\delta Q_g = \frac{\Delta Q_g}{Q_{го}} = \frac{Q_{жс}}{Q_{го}} \frac{1-\beta}{\beta} \quad (6)$$

Выразим величину $\frac{Q_{жс}}{Q_{го}}$ через начальное газосодержание смеси на входе в сепаратор.

Уравнение расхода жидкости:

$$Q_{жс} = Q_{жс} + Q_{жг} = Q_{жс} + Q_g \frac{\gamma}{1-\gamma} \quad (7)$$

Объединяя уравнения (4) и (7) в систему получим:

$$\begin{cases} Q_{жс} + Q_g \frac{\gamma}{1-\gamma} = Q_{жс} \\ Q_{жс} \frac{1-\beta}{\beta} + Q_g = Q_{го} \end{cases} \quad (8)$$

Из системы уравнений (8) получаем расход смеси:

$$Q_{см} = Q_{жс} + Q_{го} = \frac{Q_{жс}}{\beta} + \frac{Q_g}{1-\gamma} \quad (9)$$

Решаем систему (8) методом подстановки относительно переменных $Q_{жс}$ и Q_g . Выразим из 2-го уравнения системы (8) Q_g :

$$Q_g = Q_{го} - Q_{жс} \frac{1-\beta}{\beta} \quad (10)$$

Получаем:

$$\frac{Q_{жс}}{Q_{зс}} = \frac{\frac{1-\alpha}{\alpha} - \frac{\gamma}{1-\gamma}}{1 - \frac{\gamma}{1-\gamma} \frac{1-\beta}{\beta}} \quad (11)$$

где $\alpha = \frac{Q_{зс}}{Q_{жс} - Q_{зс}}$

Тогда по формуле (6):

$$\delta Q_{зс} = \frac{\frac{1-\alpha}{\alpha} - \frac{\gamma}{1-\gamma}}{1 - \frac{\gamma}{1-\gamma} \frac{1-\beta}{\beta}} \times \frac{1-\beta}{\beta} \quad (12)$$

Далее найдем относительную методическую погрешность измерения объема жидкости.

Абсолютная погрешность измерения расхода жидкости вычисляется аналогично погрешности по газу по формуле (5):

$$\Delta Q_{жс} = Q_{жс}^{изм} - Q_{жс} = Q_{жс} - (Q_{жс} + Q_{зс} \frac{\gamma}{1-\gamma}) = -Q_{зс} \frac{\gamma}{1-\gamma} \quad (13)$$

Относительная погрешность измерения расхода жидкости.

$$\delta Q_{жс} = \frac{\Delta Q_{жс}}{Q_{жс}} = \frac{Q_{зс}}{Q_{жс}} \frac{\gamma}{1-\gamma} \quad (14)$$

Для определения отношения $\frac{Q_{зс}}{Q_{жс}}$ запишем выражение из решения системы (8):

$$Q_{жс} = Q_{жс} \frac{1 - \frac{\gamma}{1-\gamma} \times \frac{Q_{зс}}{Q_{жс}}}{1 - \frac{\gamma}{1-\gamma} \times \frac{1-\beta}{\beta}} \quad (15)$$

Подставляя (15) в (10), получаем:

$$Q_{зс} = Q_{жс} \frac{\frac{Q_{зс}}{Q_{жс}} - \frac{1-\beta}{\beta}}{1 - \frac{\gamma}{1-\gamma} \times \frac{1-\beta}{\beta}} \quad (16)$$

Учитывая, что $\frac{Q_{зс}}{Q_{жс}} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$, получаем

$$\frac{Q_{зс}}{Q_{жс}} = \frac{\frac{\alpha}{1-\alpha} - \frac{1-\beta}{\beta}}{1 - \frac{\gamma}{1-\gamma} \times \frac{1-\beta}{\beta}} \quad (17)$$

$$\delta Q_{жс} = \frac{\gamma}{1-\gamma} \times \frac{\frac{\alpha}{1-\alpha} - \frac{1-\beta}{\beta}}{1 - \frac{\gamma}{1-\gamma} \times \frac{1-\beta}{\beta}} \quad (18)$$

В результате получены две формулы (12) и (18) для оценки методической составляющей относительной погрешности сепарационного метода измерения, на основании которых представлены графики зависимости этих погрешностей от величины газосодержания (см. рисунки 2, 3). Примем:

- коэффициент сепарации $\beta = 0,95$;
- коэффициент уноса жидкости $\gamma = 0,01$.

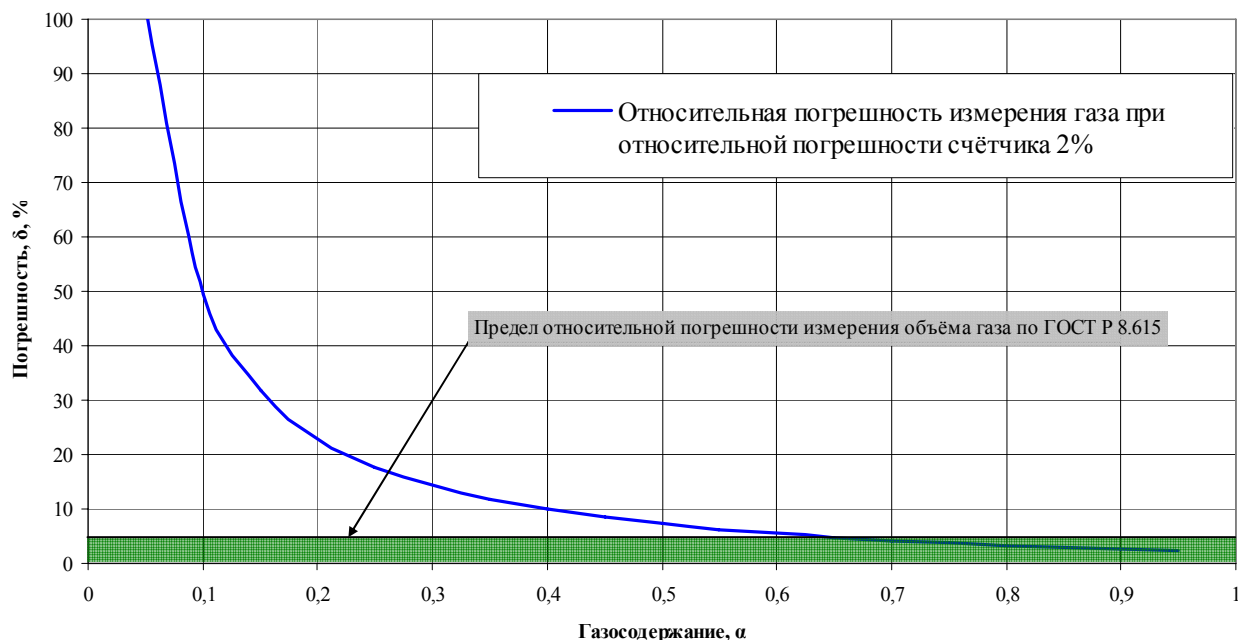


Рисунок 2 — зависимость погрешности измерения газа от величины газосодержания

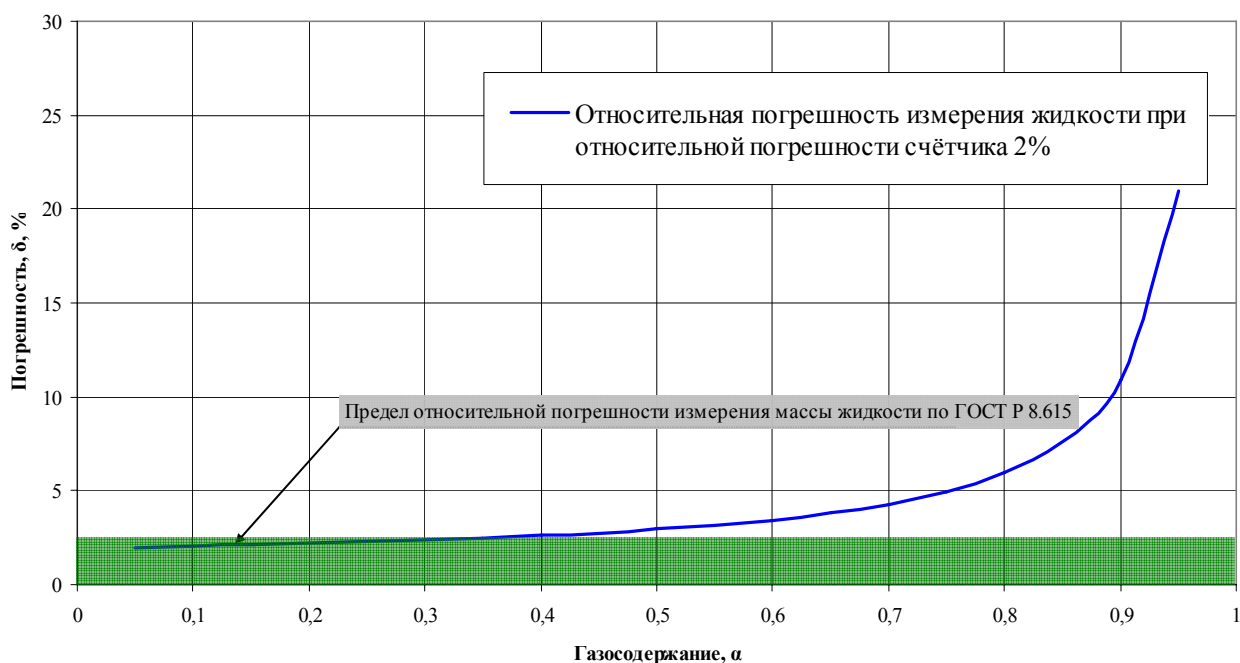


Рисунок 3 — зависимость погрешности измерения жидкости от величины газосодержания

Из графиков видно, что при газосодержании от 0 до 30 % и от 90 до 100 % методическая погрешность сепарационного метода довольно существенна. При низком качестве сепарации и большом коэффициенте уноса жидкости эти погрешности будут расти.

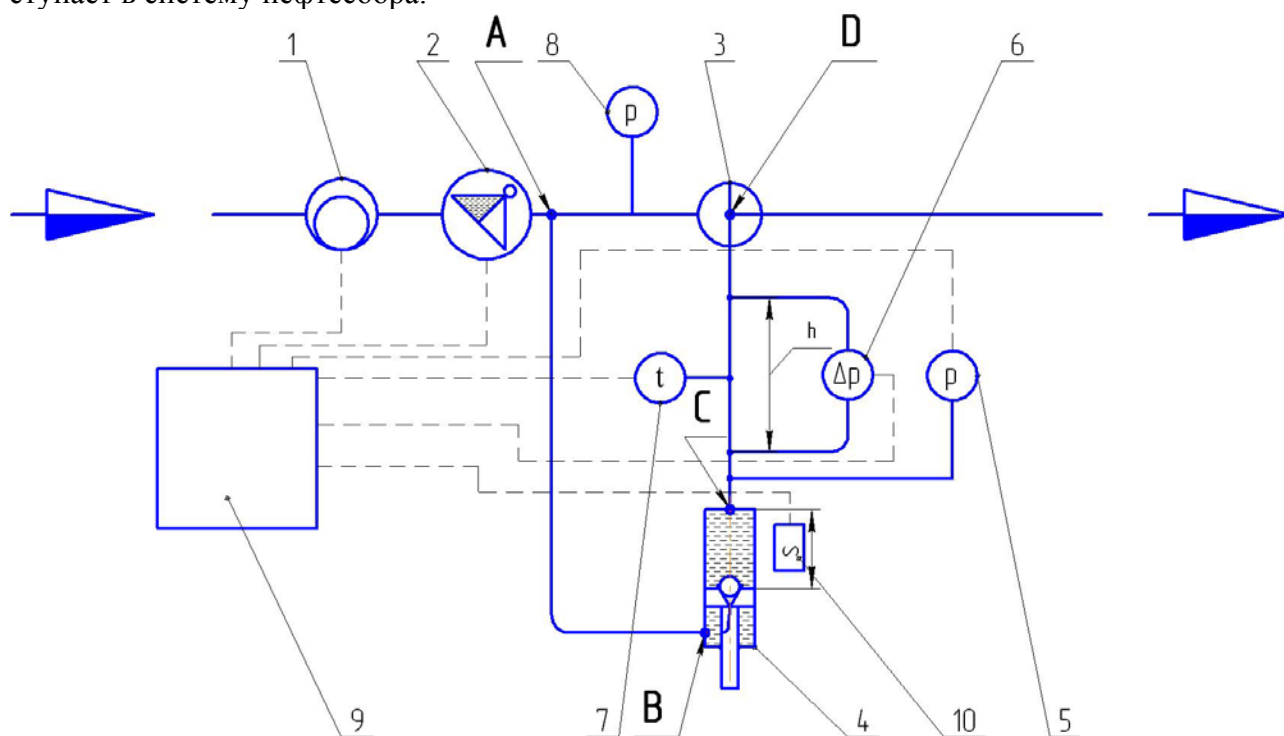
Из графиков также видно, что при данном методе измерения, погрешность измерения газа соответствует требованиям ГОСТ Р 8.615 только при газосодержании более 60 %, а погрешность измерения жидкости при газосодержании менее 40 %.

Наряду с традиционным сепарационным методом возможно применение и других методов которые дают более точные результаты. Об одном из таких методов будет рассказано далее.

Разностный метод измерения расхода и компонентного состава газожидкостной смеси.

На рисунке 4 представлена схема измерительного комплекса «Спектр».

Газожидкостная смесь (см. рисунок 4) поступает на вход измерительного комплекса, затем проходит через объёмный камерный счетчик 1, который производит измерение объёмного расхода (дебита) газожидкостной смеси $Q_{vсм}$. Затем, при прохождении газожидкостной смеси через счетчик 2 (например, типа СКЖ), производится измерение массового расхода (дебита) жидкости $Q_{mж}$. После чего газожидкостная смесь проходит по линии **A-B-C-D** и поступает в систему нефтесбора.



- 1 – преобразователь расхода объёмного камерного счётчика; 2 – преобразователь расхода счетчика СКЖ;
 3 – трёхходовой кран; 4 – гидроцилиндр; 5 – датчик давления; 6 – датчик перепада давления;
 7 – датчик температуры; 8 – манометр; 9 – блок управления и обработки результатов измерения;
 10 – датчик положения.

Рисунок 4 – измерительный комплекс «Спектр»

Таким образом, мы получили один из интересующих нас параметров – это массовый дебит жидкости. Расход газа в составе газожидкостной смеси можно определить из разности объёмных расходов газожидкостной смеси и жидкости:

$$Q_g = Q_{vсм} - Q_{vж} = Q_{vсм} - \frac{Q_{mж}}{\rho_{ж}}, \quad (19)$$

где Q_2 – объёмный расход газа в составе газожидкостной смеси при рабочих условиях; $Q_{vсм}$ – объёмный расход газожидкостной смеси при рабочих условиях; $Q_{тжс}$ – массовый расход жидкости в составе газожидкостной смеси; $\rho_{жс}$ – плотность жидкости в составе газожидкостной смеси.

Как видно из уравнения (19) мы имеем один неизвестный параметр $\rho_{жс}$. Для определения этого неизвестного параметра в гидравлической линии измерительного комплекса производится переключение направления движения потока переключателем потока 3 (например, трехходовым краном) в линию **A-D**. После чего происходит отсечка газожидкостного потока в линии **A-B-C-D**. Объём в виде пробы газожидкостной смеси, остающийся в линии **A-B-C-D**, подвергается анализу. Результатом анализа является определение плотности жидкости $\rho_{жс}$, объёмной доли воды, нефти и газа.

Анализ пробы газожидкостной смеси производится следующим образом. Вначале датчиком давления 5 измеряется давление p_1 в линии **A-B-C-D**, и измеряется датчиком перепада давления 6 перепада давления Δp_1 , создаваемый газожидкостной смесью на вертикальном участке линии **C-D**.

Затем, перемещая поршень в гидроцилиндре 4, сжимаем газожидкостную смесь, приращиваем существующее давление до величины p_2 .

Затем, переключая переключатель потока 3 поток вновь направляем по линии **A-B-C-D**, вытесняя тем самым предыдущую порцию газожидкостной смеси.

Измеренная информация поступает в блок обработки результатов измерений, где производится обработка поступающей информации по следующему алгоритму.

По измеренному перепаду давления Δp_1 , определяется плотность газожидкостной смеси $\rho_{см1}$ при давлении p_1 :

$$\rho_{см1} = \frac{\Delta p_1}{gh}, \quad (20)$$

где g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$); h – высота столба газожидкостной смеси между точками измерения перепада давления.

По известным значениям объёма смеси $V_{см1}$ и $V_{см2}$ на участке **C-D**, соответственно, при давлении p_1 и p_2 , определяем объём жидкости $V_{жс}$ в составе газожидкостной смеси по формуле:

$$V_{жс} = \frac{p_1 V_{см1} - p_2 V_{см2}}{p_1 - p_2}. \quad (21)$$

Затем по известным значениям $V_{см1}$ и $V_{жс}$ определяем объёмную долю газа $\alpha_{г1}$ при давлении p_1 :

$$\alpha_{г1} = \frac{V_{см1} - V_{жс}}{V_{см1}}. \quad (22)$$

Далее определяем плотность жидкости:

$$\rho_{жс} = \frac{\rho_{см1} - \rho_{г1} \alpha_{г1}}{1 - \alpha_{г1}}, \quad (23)$$

где $\rho_{г1}$ – плотность газа, приведённая к рабочим условиям.

Подставляя величину $\rho_{жс}$ в формулу (19) определяем расход (дебит) газа.

По известным значениям плотности нефти ρ_n и плотности воды ρ_v определяем объёмную долю воды в составе газожидкостной смеси:

$$W = \frac{\rho_{жс} - \rho_n}{\rho_v - \rho_n}. \quad (24)$$

Таким образом, с помощью измерительного комплекса, схема которого показана на рисунке 4, возможно измерение следующих параметров:

- объёмного расхода (дебита) газожидкостной смеси;
- массового расхода жидкости;
- объёмного расхода (дебита) газа;
- плотности смеси;
- плотности жидкости;
- объёмных долей нефти, воды и газа в составе газожидкостной смеси.

Очевидным преимуществом описанной схемы измерительного комплекса является то, что не требуется осуществление традиционного отбора проб, то есть, нет необходимости слива пробы в контейнер и доставки её для анализа в лабораторию.

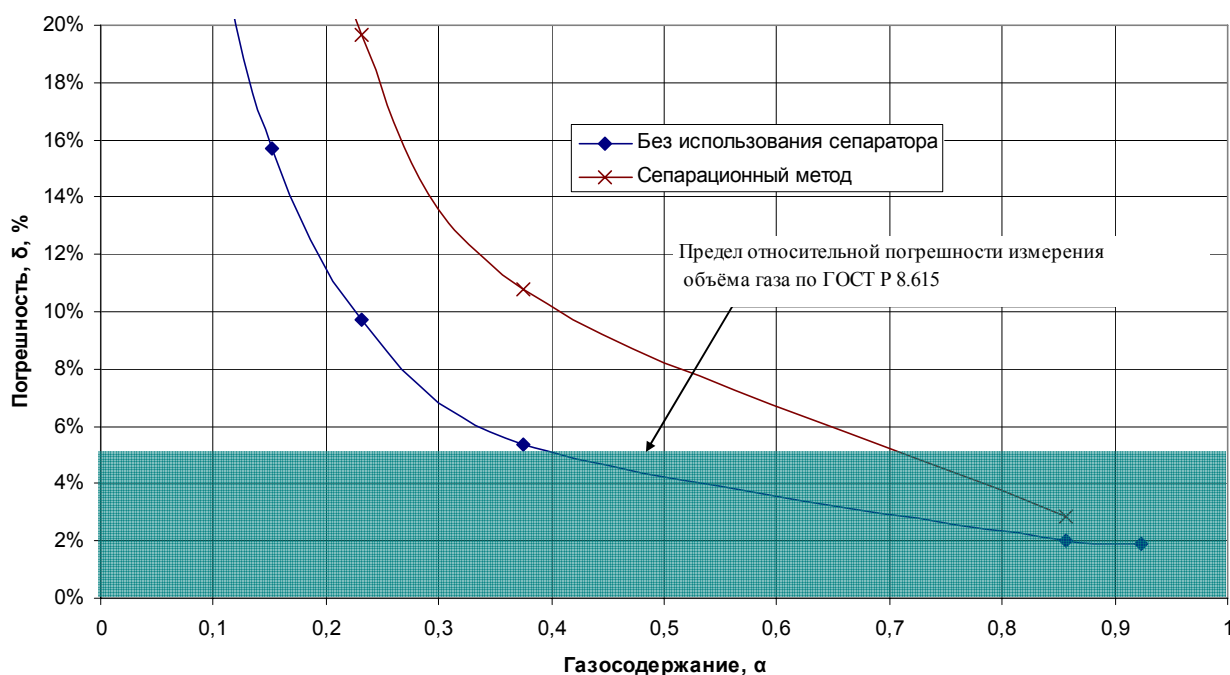


Рисунок 5 — зависимость погрешности измерения газа от величины газосодержания.

На рисунке 5 представлены сравнительные кривые погрешностей измерения газа при измерении разными методами. Как видно из графика разностный метод дает меньшую погрешность по сравнению с сепарационным методом.