

А. К. ПЕТРОВА

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

## ПОДХОД К ПОСТАНОВКЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ БАЛАНСОМ ГАЗА НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ НЕБАЛАНСА И ЕГО ПРИЧИН

*Баланс газа является важным критерием эффективности деятельности газотранспортной системы. В случае расхождения между значениями величин поступивших и отобранных объемов газа, образуется небаланс, для борьбы с которым предпринимается ряд мер по устранению и профилактике. С целью минимизации потерь от небаланса и оптимизации затрат на борьбу с ним, является актуальным исследование возможностей применения новых методов и подходов. В докладе рассматривается подход, основанный на взаимосвязи причин небаланса и величины отклонений результатов измерений расхода газа, длительности и скорости нарастания этих отклонений.*

**Введение.** Баланс газа определяется путем сравнения объемов газа на входе и выходе газотранспортной системы за определённый период и является важным критерием ее эффективности. Следует отметить, что, несмотря на значительное повышение эффективности системы управления балансом газа благодаря применению автоматизированных средств, нередко возникает необходимость устранения небаланса, разницы между поступившим в трубопроводную сеть и отобранным из нее участниками учета объемом газа [1, 2, 3]. Для устранения небаланса осуществляются определенные мероприятия, а также, согласно регламентам, предпринимается ряд мер по его профилактике, каждое из мероприятий по поддержанию баланса в газотранспортной системе имеет свою стоимость. Поскольку небаланс также имеет свою стоимость, и негативно сказывается на показателях эффективности газотранспортной системы, представляется актуальным сформулировать задачу оптимизации на основе критерия минимизации потерь на небаланс, его профилактику и устранение, и исследовать при этом применение подходов, которые бы позволили повысить эффективность принимаемых решений о целесообразности осуществления того или иного мероприятия. Предлагаемый доклад основан на применении, для решения этой задачи, взаимосвязи параметров небаланса, таких как величина, длительность, скорость нарастания отклонений результатов измерений расхода газа с факторами-причинами этих отклонений.

**Описание задачи.** Система управления балансом газа в газотранспортной системе (ГТС) представлена на рисунке.

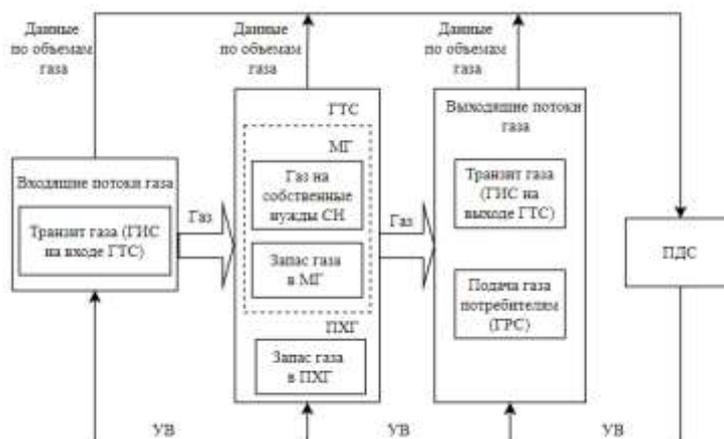


Рисунок. Система управления балансом газа в ГТС

В систему управления балансом газа входят следующие структурные элементы:  
1. Газораспределительные станции (ГРС).

2. Газоизмерительные станции (ГИС) на входе и выходе ГТС.
  3. Магистральный газопровод (МГ), содержащий вместе с транспортируемым, газ, откладываемый в запас, и газ, потребляемый на собственные нужды (СН).
  4. Резервуары для подземного хранения газа (ПХГ).
  5. Производственно-диспетчерская служба (ПДС).
- Уравнение баланса газа в ГТС в общем виде выглядит следующим образом [4]:

$$\sum_t Q_{t \text{ ГИС вх}} - (\sum_t Q_{t \text{ ГРС}} + \sum_t Q_{t \text{ ГИС вых}} + \sum_t Q_{t \text{ МГ}} + \sum_t Q_{t \text{ СН}} + \sum_t Q_{t \text{ ПХГ}}) = 0, \quad (1)$$

где:  $t \in [0, T]$ , период времени, за который сводится баланс;

$\sum_t Q_{t \text{ ГИС вх}}$  и  $\sum_t Q_{t \text{ ГИС вых}}$  – объемы газа, проходящие через газоизмерительные станции на входе и выходе газотранспортной системы, млн.м<sup>3</sup>;

$\sum_t Q_{t \text{ МГ}}$  – объем газа, откладываемый в магистральном трубопроводе, или запас газа, млн м<sup>3</sup>;

$\sum_t Q_{t \text{ СН}}$  – объем газа, расходуемый на собственные нужды, млн.м<sup>3</sup>. На 97 % состоит из расходов на транспортировку газа, то есть  $Q_{\text{СН}} \cong Q_{\text{Тр}}$ , при этом должны соблюдаться требования регламентов по расходам на транспортировку:

$$Q_{\text{СН}} \leq Q_{\text{регл}} \quad (2)$$

$\sum_t Q_{t \text{ ПХГ}}$  – запас газа в подземном хранилище газа, млн м<sup>3</sup>, на входе хранилища стоит специальная ГИС<sub>ПХГ</sub> для измерения объемного расхода в нем;

$\sum_t Q_{t \text{ ГРС}}$  – объемы газа, равные суммарному расходу на всех газораспределительных станциях данной газотранспортной системы, млн м<sup>3</sup>.

Все величины объемов газа в формуле (1), кроме  $\sum_t Q_{t \text{ МГ}}$  и  $\sum_t Q_{t \text{ СН}}$ , определяются методами измерения расхода, определяемыми регламентами технологического процесса учета расхода газа [12–17]. Величина  $\sum_t Q_{t \text{ МГ}}$  определяется расчетным путем [18].

Пусть газотранспортная сеть включает в себя  $N$  газораспределительных станций, объем расхода газа на каждой из которых обозначается  $Q_{\text{ГРС } n}$ . Сумму расхода на всех газораспределительных станциях за время  $T$  можно определить следующим образом:

$$\sum_t Q_{t \text{ ГРС}} = \sum_t \sum_n Q_{t \text{ ГРС}}^{(n)}, \quad (3)$$

где:  $n = \overline{1, N}$ ,  $t \in [0, T]$ .

С  $n$ -й ГРС газ поставляется  $J^{(n)}$  предприятиям, для которых должны соблюдаться объемы поставок газа, согласно заключенным договорам. Для  $n$ -й газораспределительной станции и  $j$ -го предприятия можно это условие обозначить как:

$$Q_j^{(n)} = Q_{\text{дог } j}^{(n)}, j = \overline{1, J} \quad (4)$$

Тогда объем газа, израсходованного за время  $T$  на  $n$ -й газораспределительной станции подключенными к ней  $J^{(n)}$  потребителями, можно выразить формулой:

$$Q_{t \text{ ГРС}}^{(n)} = \sum_t \sum_j Q_{t \text{ дог } j}^{(n)}, \quad (5)$$

где:  $n = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, J}$ ,  $t \in [0, T]$ .

Подставив (5) в (3) получаем следующее выражение для определения суммарного расхода газа на всех газораспределительных станциях региональной газотранспортной системы:

$$\sum_t Q_{t \text{ ГРС}} = \sum_t \sum_n \sum_j Q_{t \text{ дог } j}^{(n)}, \quad (6)$$

где:  $j = \overline{1, J}$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,  $t \in [0, T]$ .

Если баланс не соблюдается, в системе, за время  $T$ , имеет место небаланс  $\sum_t Q_{t \text{ неб}}$ , который можно выразить из выражения (1):

$$\sum_t Q_{t \text{ неб}} = \sum_t Q_{t \text{ ГИС вх}} - (\sum_t Q_{t \text{ ГРС}} + \sum_t Q_{t \text{ ГИС вых}} + \sum_t Q_{t \text{ МГ}} + \sum_t Q_{t \text{ СН}} + \sum_t Q_{t \text{ ПХГ}}) \quad (7)$$

Небаланс необходимо устранить:

$$\sum_t Q_{t \text{ неб}} \rightarrow 0 \quad (8)$$

В статье рассматривается 9 уровней небаланса, измеряющихся в млн м<sup>3</sup>, определяемых в зависимости от сочетания 3-х параметров (табл. 1). Одним из параметров является величина отклонений текущих значений технологического процесса учета расхода газа объектах газотранспортной системы от данных, полученных при помощи прогнозирования на основе нейронных сетей, обученных ранее на статистических данных этих же станций. Вторым и третьим параметрами являются длительность и скорость нарастания этих отклонений, соответственно. Таким образом, за период  $T$  на таких объектах ГТС, как газораспределительные станции, а также на газоизмерительные станции на входе и выходе газотранспортной системы и в подземном хранилище, измеряются значения этих трех параметров, определяя соответствующий уровень небаланса на каждом из объектов.

Таблица 1

Уровни небаланса в ГТС

Длительность отклонения	Отклонение результатов нейросетевых алгоритмов от данных ТП учета расхода								
	Маленькое			Среднее			Большое		
	Скорость нарастания отклонения								
	Маленькая	Средняя	Большая	Маленькая	Средняя	Большая	Маленькая	Средняя	Большая
Только появилось	Незначительный	Незначительный	Маленький	Небольшой	Средний	Существенный	Значительный	Большой	Очень большой
Длится среднее время	Незначительный	Маленький	Небольшой	Средний	Существенный	Значительный	Большой	Очень большой	Критический
Длится долго	Маленький	Небольшой	Средний	Существенный	Значительный	Большой	Очень большой	Критический	Критический

Обозначим уровни небаланса в газотранспортной системе как  $Q_{\text{неб}}^{(i)}, i = \overline{1, I}, I = 9$ .

Тогда (7) можно определить следующим образом:

$$\sum_t \sum_i Q_{t \text{ неб}}^{(i)} = (\sum_t Q_{t \text{ гис вх}} - \sum_t \sum_i Q_{t \text{ неб гис вх}}^{(i)}) - ((\sum_t Q_{t \text{ грс}} - \sum_t \sum_i Q_{t \text{ неб грс}}^{(i)}) + (\sum_t Q_{t \text{ гис вых}} - \sum_t \sum_i Q_{t \text{ неб гис вых}}^{(i)}) + \sum_t Q_{t \text{ мг}} + \sum_t Q_{t \text{ сн}} + (\sum_t Q_{t \text{ пхг}} - \sum_t \sum_i Q_{t \text{ неб пхг}}^{(i)})) \quad (9)$$

При этом величины небалансов на объектах газотранспортной системы, могут определяться различными факторами-причинами небаланса  $\varphi_g, g = \overline{1, G}$ ; на данный момент выявлено и обобщено  $G = 33$  фактора, на основе анализа литературных источников [5–11] и консультаций с экспертами (табл. 2).

Таблица 2

Факторы – причины небаланса

Трубопровод	Свойства газа	Средства и процесс измерения	Процедура учета и расчета	Другие организационные факторы
1. Угол наклона к горизонту 2. Изменение геометрии в течение срока службы 3. Перепад в диаметре трубы 4. Повышение коэффициента шероховатости внутри стенок 5. Негерметичность фланцевых соединений 6. Свищ (утечка)	7. Изменение молярной доли метана 8. Наличие водяных паров и гидрозатворы 9. Наличие кислорода 10. Механические примеси 11. Характер течения и тангенциальный разрыв	13. Погрешность или отклонения в работе СИ (в т.ч. притупление входной кромки диафрагмы в методе перепада давления) 14. Вибрация оборудования 15. Импульсный режим (для турбинных счетчиков) 16. Диапазон измерений не по паспорту СИ (для счетчиков) 17. Местонахождение СИ, улица или помещение	18. Отсутствие учета при продувках 19. Пограничные узлы 20. Линеаризация расчётных величин 21. Договорные значения на границах ГТС 22. Отклонение режимов работы от проектных 23. Неучтенный запас МГ	24. Низкая квалификация персонала, ведущего учет 25. Погодные условия (резкие скачки параметров) 26. Регион (температурные нормы) 27. Размер населенных пунктов и теплотрасс, влияющих на трубу 28. Наличие линий связей, влияющих на обмен данными 29. Несоответствие нормативов потребления реальному потреблению 30. Разные отчетные периоды, у поставщика и потребителя 31. Принятие условно постоянных величин для разных групп потребителей

Трубопровод	Свойства газа	Средства и процесс измерения	Процедура учета и расчета	Другие организационные факторы
	12. в нестационарном режиме.			32. Технологические потери при обслуживании трубы и транспортировке газа 33. Отбор газа без его учета (врезка) 34. Авария, разрыв

Некоторые факторы-причины необходимо устранять незамедлительно, такие как утечки, несанкционированные врезки, разрывы ( $\varphi_6, \varphi_{32}, \varphi_{33}$  в табл. 2). Другие можно устранять в соответствии с графиком профилактических мероприятий ( $\varphi_7, \varphi_{12}, \varphi_{14}$ ).

Для борьбы с небалансом предпринимаются мероприятия по его устранению и профилактике. Мероприятия по профилактике и устранению не полностью совпадают между собой. Суммарные затраты на борьбу с небалансом за период  $T$  складываются:

$$\sum_t K_{затр} = \sum_t \sum_m K_{t\text{ ус}}^{(m)} + \sum_t \sum_l K_{t\text{ пр}}^{(l)}, \quad (10)$$

где:  $K_{\text{ус } m}$  – стоимость мероприятия по устранению,  $m = \overline{1, M}$ ;  $M$  – количество существующих мероприятий по устранению, в ходе анализа регламентных документов было определено количество мероприятий,  $M = 7$ .

$K_{\text{пр } l}$  – стоимость мероприятия по профилактике,  $l = \overline{1, L}$ ;  $L$  – количество мероприятий по профилактике;  $L = 5$ .

Каждому уровню небаланса  $Q_{\text{неб } i}$ ,  $i = \overline{1, 9}$  соответствует определенный на основе экспертных мнений набор факторов-причин:  $\forall Q_{\text{неб } i} \exists \varphi_{g/i}$ . Например, причиной небольшого отклонения, длящегося долго, но не нарастающего, скорее всего, является погрешность средств измерения. Причиной же длящегося долго, нарастающего небаланса большой величины является, скорее всего, разрыв. Каждому выявленному фактору-причине можно поставить в соответствие определенные мероприятия:  $\forall \varphi_{g/i} \exists K_{затр \varphi_{g/i}}$ . Можно записать, что  $\forall Q_{\text{неб } i} \exists K_{затр \varphi_{g/i}}: Q_{\text{неб } i} = 0$ , то есть, для любого уровня небаланса существуют мероприятия, которые его устранят его факторы-причины.

Однако, согласно экспертным оценкам, некоторые факторы-причины, например, утечки, могут создавать пожарную и взрывоопасность, и должны быть устранены в первую очередь, невзирая на расходы на мероприятия. Для учета этих особенностей подобных факторов, предлагается ввести понятие веса  $V = \overline{1, 10}$ , где  $V=10$  соответствует максимальному весу,  $V=1$  – минимальному, и формируется условие: если причиной небаланса является утечка, врезка, разрыв и т. п., то мероприятие по устранению приобретает максимальный вес:

$$\text{IF } \varphi_{g/i}: g = [5, 6, 9, 32, 33] \Rightarrow K_{т\text{ затр } \varphi_{g/i}} = V_g \cdot K_{т\text{ ус } \varphi_{g/i}}^m, V=10 \quad (11)$$

где:  $i = \overline{1, 9}$ ,  $g = \overline{1, G}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $t \in [0, T]$ .

Для остальных факторов причин вес также определяется экспертным путем.

Если причина небаланса такова, что можно ждать очередного мероприятия по профилактике, то необходимо сравнить потери от небаланса в течение периода времени до момента профилактики и затраты на внеочередное устранение, и принять решение, обеспечивающее меньшие потери:

$$\text{IF } \varphi_{g/i}: g \neq [5, 6, 9, 32, 33] \text{ AND } \sum_{t\text{ проф}} K_{Q\text{неб } t \varphi_{g/i}} \leq K_{т\text{ ус } \varphi_{g/i}}^m \Rightarrow K_{\text{пр } \varphi_{g/i}}^l, \text{ ELSE } K_{\text{ус } \varphi_{g/i}}^m \quad (12)$$

Выражение (10) для определения суммарной стоимости борьбы с небалансом за период времени  $T$  можно тогда записать в следующем виде:

$$\sum_t \sum_i K_{т\text{ затр } \varphi_{g/i}} = \sum_t \sum_i \sum_m V_g \cdot K_{т\text{ ус } \varphi_{g/i}}^{(m)} + \sum_t \sum_i \sum_l V_g \cdot K_{т\text{ пр } \varphi_{g/i}}^{(l)} \quad (13)$$

где:  $i = \overline{1, 9}$ ,  $g = \overline{1, G}$ ,  $l = \overline{1, L}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $V = \overline{1, 10}$ ,  $t \in [0, T]$ .

Эти затраты необходимо минимизировать  $\sum_t \sum_i K_{т\text{ затр } \varphi_{g/i}} \rightarrow \min$ .

**Математическая модель.** Цель оптимизационной задачи – минимизировать суммарные потери: от небаланса и от расходов на борьбу с ним, при существующих ограничениях, в периоде времени  $T$ . После приведения выражений (9) и (11) к единым единицам измерения, в данном случае, к денежным средствам, путем умножения величин объемов на цену кубометра газа, математическое описание задачи имеет вид:

$$(\sum_t \sum_i K_{t \text{ затр } \varphi_{gi}} + \sum_t \sum_i K_{Qt \text{ неб}}^{(i)}) = \min \quad (14)$$

где:  $i = \overline{1,9}$  – уровни небаланса, на основе его параметров (величины отклонений результатов измерений расхода газа, длительности и скорости нарастания этих отклонений);

$g = \overline{1,6}$  – факторы-причины, в зависимости от сочетания параметров небаланса;

$t \in [0, T]$  – период времени, в котором сводится баланс.

$\sum_t \sum_i K_{Qt \text{ неб}}^{(i)}$  – потери от небаланса, определяются на основе выражения (9);

$\sum_t \sum_i K_{t \text{ затр } \varphi_{gi}}$  – расходы на борьбу с небалансом, определяются выражением (13).

#### Условия и ограничения.

IF  $\varphi_{gi}$ :  $g = [5, 6, 9, 32, 33] \Rightarrow V_g \cdot K_{t \text{ ус } \varphi_{gi}}^m$  – необходимость первоочередного устранения причин с большим весом, определяется выражением (11);

$K_{Qj}^{(n)} = K_{Q \text{ дог } j}^{(n)}$ ,  $j = \overline{1, J}$ ,  $n = \overline{1, N}$  – необходимость выполнения договоров поставок  $j$ -му предприятию на  $n$ -ой газораспределительной станции, определяются на основе выражения (4);

$K_{Q \text{ сн}} \leq K_{Q \text{ регл}}$  – необходимость выполнения регламентов по затратам на транспортировку, определяется на основе выражения (2);

IF  $\varphi_{gi}$ :  $g \neq [5, 6, 9, 32, 33]$  AND  $\sum_{t \text{ проф}} K_{Q \text{ неб } t \varphi_{gi}} \leq K_{t \text{ ус } \varphi_{gi}}^m \Rightarrow K_{\text{пр } \varphi_{gi}}^l$ , ELSE  $K_{\text{ус } \varphi_{gi}}^m$  – минимизация расходов на мероприятия;

$K_{\text{затр}} \geq 0$ ,  $K_{Q \text{ гис вх}} \geq 0$ ,  $K_{Q \text{ грс}} \geq 0$ ,  $K_{Q \text{ гис выз}} \geq 0$ ,  $K_{Q \text{ пнг}} \geq 0$ ,  $K_{Q \text{ сн}} \geq 0$  – все величины, кроме  $K_{Q \text{ мг}}$ , неотрицательные.

**Заключение.** В статье рассматривается постановка оптимизационной задачи в системе управления балансом газа в газотранспортной системе. Цель задачи – минимизировать суммарные потери: от небаланса и от расходов на борьбу с ним, при существующих ограничениях, в периоде времени  $T$ . Рассмотрена взаимосвязь мероприятий по устранению факторов-причин небаланса с сочетанием трех его параметров: величиной отклонений результатов измерений расхода газа, длительностью и скоростью нарастания этих отклонений. В условия задачи включены такие ограничения, как необходимость выполнения договоров поставок предприятиям-потребителям, необходимость выполнения регламентов по затратам на транспортировку, необходимость первоочередного устранения наиболее важных причин, так как утечки. Для решения этой задачи предполагается рассматривать применение методов дискретной оптимизации, например, метода последовательных уступок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ПР 50.2. Количество природного газа. Типовая методика выполнения измерений объемов природного газа в реальных условиях эксплуатации при взаимных расчетах между поставщиком и потребителями, ФГУП ВНИИМС, Москва 2003
2. Сайт ГК «Газовик» [Электронный ресурс] Режим доступа: // <https://gazovik-sbyt.ru/directory/consum/term.html> (дата обращения 15.02.2019)
3. Горбунов С.С., Констандян А.В., Дубинин В.А., Констандян В.А. Построение системы идентификации источников и причин небаланса газа в газотранспортной системе, *Газовая Промышленность* Спецвыпуск № 2 | 786 | 2019.
4. Организация, планирование и управление на предприятиях транспорта и хранения нефти и газа: учебник для вузов / А.Д. Бренц [и др.]. М.: Недра, 1980. 580 с.
5. Лодочкин Н.И. Пути решения проблем небаланса и коммерческих потерь поставщика газа докторская дисс.
6. Горбунов С.С., Констандян А.В., Дубинин В.А., Констандян В.А. Построение системы идентификации источников и причин небаланса газа в газотранспортной системе, *Газовая Промышленность* Спецвыпуск № 2 | 786 | 2019
7. Информационно-аналитический портал Neftegaz.RU [Электронный ресурс] Режим доступа: // <https://neftgaz.ru/news/gazoraspredelenie/665125-proverka-vyavila-v-severo-kavkazskom-federalnom-okruge-bolee-7-8-mln-m3-nedouchtennogo-gaza/> (дата обращения 11.05.2021)

8. **Тухбатуллин Ф.Г., Семейченков Д.С., Тухбатуллин Т.Ф.** Метрологический фактор наличия небаланса в системе «ГРС – Потребитель». *Труды РГУ Нефти и Газа (НИУ) им. И.М. Губкина*, 2017 №4 С 86-94
9. **Тухбатуллин Ф.Г., Семейченков Д.С.** О причинах небаланса природного газа в системе газораспределения и методах прогнозирования его величины. *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2017. № 6. С. 14–20.
10. **Комиссаров С.Ю., Горбенко А.А., Кутовой Д.Ю., Веснин В.И.** Создание единого информационного пространства «поставщик – потребитель» в АО «Газпром Межрегионгаз Нижний Новгород» на базе ПТК «Газ-сеть». Решение вопроса безопасности бытовых потребителей при транспортировке газа и использовании ВДГО и ВКГО. *Газовая Промышленность*, № 7 | 755 | 2017 г
11. Справочник «Газпром в цифрах 2016–2020
12. ГОСТ Р 8.563-2009 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики (методы) измерений
13. Комплекс межгосударственных стандартов ГОСТ 8.586.1-2005 - ГОСТ 8.586.5. -2005 «Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств»
14. ГОСТ Р 8.740-2011 ГСИ. Расход и количество газа. Методика измерений с помощью турбинных, ротационных и вихревых расходомеров и счетчиков
15. ГОСТ 8.611-2013 Методика (метод) измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода
16. СТО Газпром 5.32-2009 "Обеспечение единства измерений. Организация измерений природного газа"
17. СТО Газпром 2-3.5-454-2010 «Правила эксплуатации магистральных газопроводов»
18. СТО Газпром 2-3.5-051-2006 «Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов»

A.K.Petrova (St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg)

**Approach to statement of the optimization problem in the system of gas balance control based on the interrelation of the parameters of imbalance of gas and its causes**

The gas balance is an important criterion for the efficiency of the gas transmission system. Discrepancy between the values of the incoming and withdrawn gas volumes, forms an imbalance, to combat which a number of measures are taken to eliminate and prevent. In order to minimize losses from imbalances and optimize the costs of eliminating it, it is relevant to study the application of new methods and approaches. The report discusses an approach based on the relationship between the causes of imbalance and the magnitude of deviations in the results of measurements of gas flow, the duration and rate of increase of these deviations.

Авторы готовы представить текст на английском языке для сборника материалов мультиконференции, который будет подан для индексирования в Scopus.