

УДК 622.691.4.054

С.А. Сарданашвили¹, e-mail: Sardanashvili.S@gubkin.ru; Е.А. Голубятников¹, e-mail: sjusts1@gmail.com

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).

Применение методов повышения достоверности онлайн-данных и результатов моделирования режимов промысловых, магистральных, газораспределительных трубопроводных систем

Актуальность рассмотренной в статье проблемы обусловлена тем, что в настоящее время ПАО «Газпром» реализует проект модернизации Автоматизированной системы диспетчерского управления Единой системой газоснабжения. Модернизация предусматривает полную автоматизацию систем сбора параметрических данных реального времени (замеры онлайн-данных), для которых помимо детерминированных оценок значений параметров характерно наличие случайных (белый шум) и систематических погрешностей (смещение), аномальных выбросов (пиковые значения), частичная потеря или отсутствие данных (сбои в каналах связи), а также ошибки, обусловленные воздействием человеческого фактора (неправильные действия персонала).

Одновременно с процессом автоматизации информационных потоков в эксплуатирующих организациях и подразделениях дочерних обществ ПАО «Газпром» широкое развитие получают системы поддержки принятия диспетчерских решений, основанные на математическом моделировании режимов газодобывающих, газотранспортных, газораспределительных технологических комплексов. При этом качество и достоверность решения задач в таких системах во многом обусловлены полнотой и качеством онлайн-данных, точностью расчетов режимов, адекватностью моделей и достоверностью результатов, получаемых на основе этих моделей.

Новизна предлагаемых в статье методов решения данной проблемы обусловлена тем, что авторы используют современные математические методы регрессионного, дисперсного, многофакторного анализов, методы математической статистики, проверки статистических гипотез, адаптации расчетных моделей к фактическим режимам, а также статистические критерии оценки адекватности результатов моделирования.

В статье затронута лишь небольшая часть проблемы и представлен обзор ряда подходов, направленных на повышение достоверности онлайн-данных, получаемых системами телеизмерений, и адекватности результатов онлайн-моделирования, реализованных в программно-вычислительном комплексе «Веста-онлайн».

Ключевые слова: газовый промысел, магистральный газопровод, газотранспортная система, газораспределительная трубопроводная система, моделирование режимов, онлайн-данные, математический метод, адаптация, адекватность результатов моделирования.

.....

S.A. Sardanashvili¹, e-mail: Sardanashvili.S@gubkin.ru; E.A. Golubyatnikov¹, e-mail: sjusts1@gmail.com

¹ National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Moscow, Russia).

Application of Methods to Increase the Reliability of On-Line Data and Simulation Results for Regimes of Extractive, Main, Distribution Pipeline Systems

The urgency of the problem discussed in the article is due to the fact that at present Gazprom PJSC is implementing a modernization project for the Automated Dispatch Control System of the Unified Gas Supply System. Modernization provides for the complete automation of real-time parametric data collection systems (on-line data measurements) for which, in addition to deterministic estimates of parameter values, random (white noise), systematic errors (bias), abnormal emissions (peak values), partial loss or lack of data (communication channel failures), as well as errors due to the human factor (incorrect actions of personnel).

Simultaneously with the process of automation of information flows, in the operating organizations and subdivisions of the subsidiaries of Gazprom PJSC, system support for dispatch solutions based on mathematical modeling of the regimes of gas producing, gas transmission and gas distribution technological systems are widely developed. At the same time, the quality and reliability of the solution of the system' tasks are largely due to the completeness and quality of on-line data, the accuracy of mode calculations, the adequacy of models and the reliability of the results obtained on the basis of these models.

The novelty of the proposed methods for solving this problem is due to the fact that the authors use modern mathematical methods of regression, disperse, multifactor analysis, methods of mathematical statistics, testing of statistical hypotheses, adaptation of computational models to actual regimes, and statistical criteria for assessing the adequacy of simulation results.

This article touches upon only a small part of the problem and provides an overview of various approaches aimed at increasing the reliability of on-line data obtained by telemetry systems and the adequacy of on-line simulation results implemented in the Vesta on-line software complex.

Keywords: gas field, main gas pipeline, gas transport system, distribution pipeline system, modeling of modes, on-line data, mathematical method, adaptation, adequacy of simulation results.



ПРИКЛАДНЫЕ РЕЖИМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ДИСПЕТЧЕРСКИХ РЕШЕНИЙ, ОСНОВАННЫЕ НА ОНЛАЙН-ДААННЫХ

Основные задачи системы поддержки принятия диспетчерских решений (СППДР), основанные на онлайн-данных, представлены в стандарте ПАО «Газпром», регламентирующем диспетчерское управление [1] (рис. 1). Решение перечисленных задач невозможно без математической модели, адекватно отражающей не только физические процессы, но и их динамику в реальном масштабе времени при изменяющихся условиях и факторах эксплуатации технологических реальных комплексов. Несмотря на то что многие программные средства моделирования, применяемые в

ПАО «Газпром», позволяют использовать в расчетах актуальную телеметрическую информацию, в том числе полученную автоматическими системами измерения, комплексного решения проблем повышения достоверности результатов задач СППДР на сегодняшний день нет. Это обусловлено тем, что на адекватность получаемых результатов существенное влияние оказывают многочисленные факторы, основные из которых приведены на рис. 2.

Решение проблемы повышения достоверности результатов решения задач СППДР можно декомпозировать на четыре основных блока:

1) повышение достоверности массивов исходных параметрических данных, измеряемых системами телеметрии, посредством применения современных математических методов регрессион-

ного, дисперсного, многофакторного анализов, методов математической статистики и проверки статистических гипотез;

2) выбор и применение на каждом временном отрезке моделируемого реального процесса (стационарного, квазистационарного, нестационарного, изотермического, неизотермического, адиабатического, политропического и т. д.) математической модели, отражающей его основные характеристики;

3) оценка статистической адекватности результатов моделирования измеряемым онлайн-параметрам реального процесса, при значимых расхождениях выполнение настройки модели на реальный процесс посредством ее математической адаптации методом идентификации различных поправок к эмпирическим (достоверно не опре-

Для цитирования (for citation):

Сарданашвили С.А., Голубятников Е.А. Применение методов повышения достоверности онлайн-данных и результатов моделирования режимов промысловых, магистральных, газораспределительных трубопроводных систем // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 9. С. 24–34.

Sardanashvili S.A., Golubyatnikov E.A. Application of Methods to Increase the Reliability of On-Line Data and Simulation Results for Regimes of Extractive, Main, Distribution Pipeline Systems. Territorija «NEFTEGAS» = Oil and Gas Territory, 2018, No. 9, P. 24–34. (In Russ.)

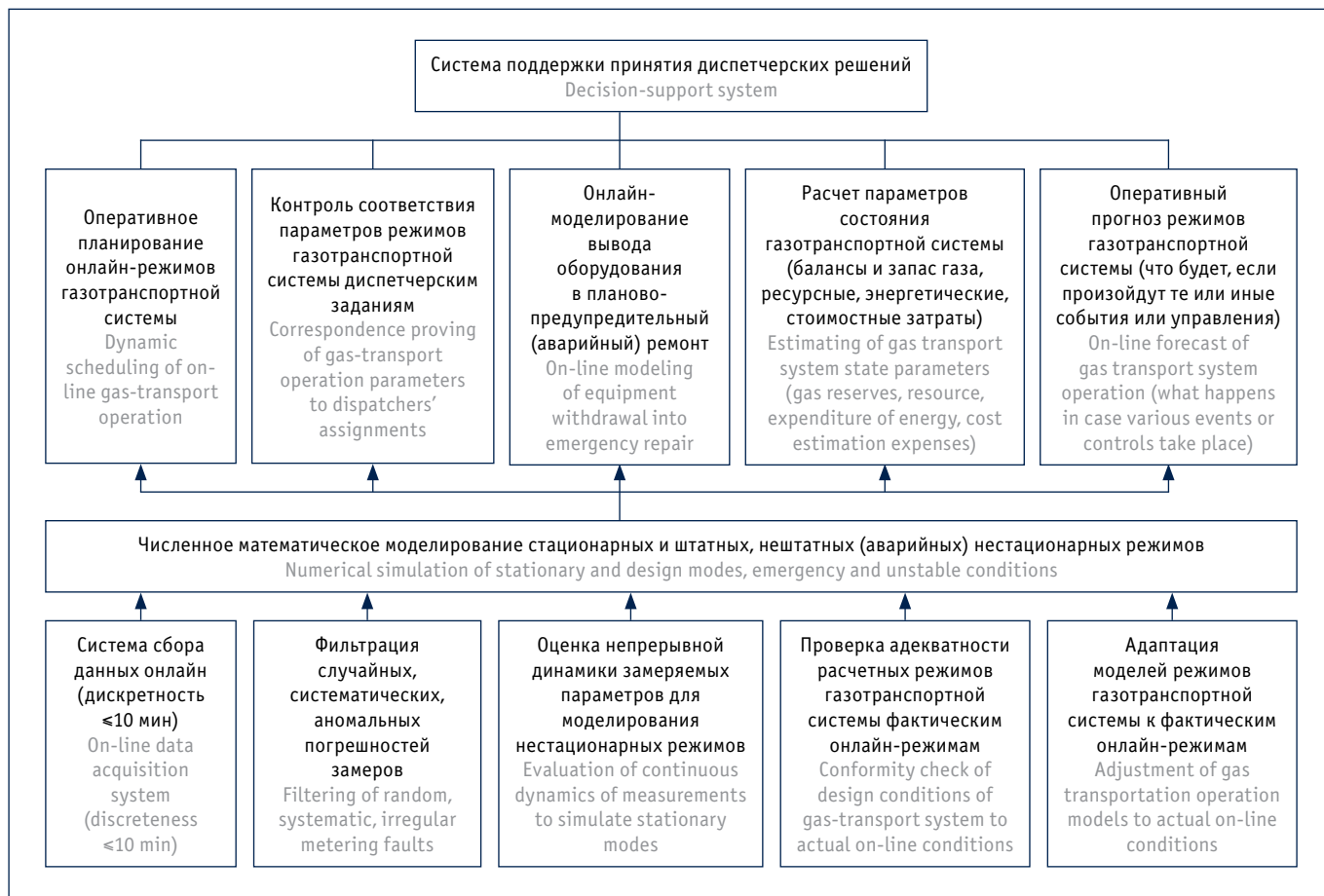


Рис. 1. Состав основных задач системы поддержки принятия диспетчерских решений на основе онлайн-моделирования
 Fig. 1. Structure of primal problems of decision-support system on the basis of on-line modeling

деленным) внутренним параметрам модели;

4) ситуационный анализ значимых параметров, характеризующих состояние технологических объектов (оборудования) и системы в целом, которые могли быть ошибочно использованы в модели.

ПРОЦЕДУРЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ОНЛАЙН-ДАННЫХ

Наиболее характерной особенностью онлайн-моделирования является то, что в качестве исходных данных применяются замеры датчиков, показания которых по мере прохождения по каналам связи, преобразований из аналоговых в цифровой формат, процедур защиты баз данных от переполнения и т. д. могут подвергаться модификации. Кроме того, на показания датчиков влияют факторы эксплуатационных условий (температура, давление, влажность, состав среды), изменений механизмов и свойств материалов.

Все это может приводить к значимым погрешностям исходных данных, которые передаются в компьютерные комплексы моделирования, возрастающих из-за погрешностей самих моделей и применяемых численных методов и в итоге к неадекватности полученных результатов в целом.

При использовании онлайн-моделирования обычно имеется набор замеров каждого параметра технологического процесса во времени $t_j, p_r^*(t_j)$, который может быть представлен стохастическим временным рядом. Для обработки временных рядов могут быть использованы различные методы математической статистики, в частности следующие.

1. Сглаживание ряда непрерывными или кусочно-непрерывными функциями $\hat{p}_r(t_j)$, (отрезками функциональных рядов: тригонометрическими, степенными, сплайновыми, ортогональными и т. д.). Применение этого метода поз-

воляет, во-первых, получить частоту квантования значений параметров с любым временным шагом, что наиболее актуально при использовании нестационарных моделей, а также при больших пропусках замеров параметров (при бездействии датчиков) во временных рядах. Во-вторых, при сглаживании выделяется детерминированная составляющая (оценка истинного значения) параметра и фильтруется влияние случайных погрешностей (различных шумов). Для сглаживания временных рядов замеров могут применяться методы линейной регрессии, сглаживания рядами Фурье, аппроксимации кубическим сплайнами. Так, в [2] представлена популярная методика адаптивной сплайн-аппроксимации, которая позволяет производить сглаживание с учетом заданных (в частности паспортных) погрешностей измерительных устройств. При этом в качестве критерия завершения построения регрессионной

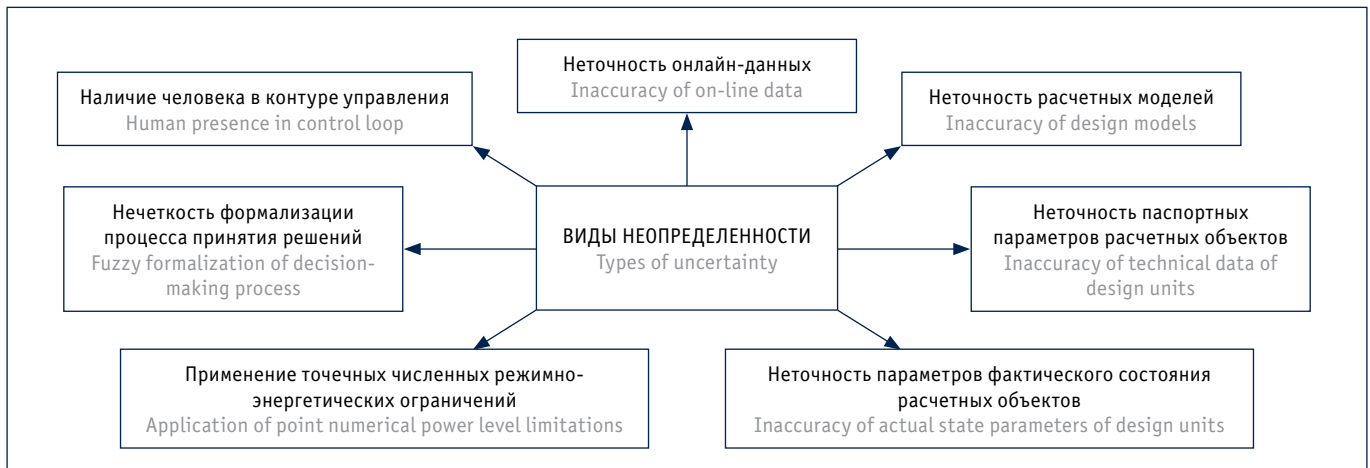


Рис. 2. Виды неопределенности при решении задач онлайн-моделирования
 Fig. 2. Types of uncertainty in solving on-line simulation problems

функции стохастического ряда может быть (чтобы не доводить процесс до интерполяционной функции, лишенной свойств фильтрации случайного шума) предложен критерий проверки гипотезы о том, что эмпирическая дисперсия погрешности невязок $\xi_j = (p_r^*(t_j) - \hat{p}_r(t_j))$ сглаживания не превышает дисперсии погрешности измерений σ_{0r}^2 соответствующего параметра.

Для проверки данной гипотезы оценка математического ожидания \hat{m}_ξ выполняется по формуле:

$$\hat{m}_\xi = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_j, \quad (1)$$

несмещенная оценка эмпирической дисперсии S_ξ^2 выполняется по формуле:

$$S_\xi^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\xi_j - \hat{m}_\xi)^2, \quad (2)$$

оценка дисперсии погрешности измерений σ_{0r}^2 вычисляется на основе предположения, что случайная составляющая замеров $\xi_{c.c.}$ имеет нормальное распределение.

Вероятность того, что детерминированная составляющая $\hat{p}_r(t_j)$ лежит в доверительном интервале $p_r^*(t_j) - \Delta_{rj}^* < p_r(t_j) < p_r^*(t_j) + \Delta_{rj}^*$ вычисляется по следующей формуле:

$$P(p_r^*(t_j) - \Delta_{rj}^* < p_r(t_j) < p_r^*(t_j) + \Delta_{rj}^*) \approx 2 \cdot \Phi\left(\frac{\Delta_{rj}^*}{\sigma_{0rj}^2}\right), \quad (3)$$

где: Φ – функция Лапласа; Δ_{rj}^* – теоретическая абсолютная погрешность показаний прибора $p_r^*(t_j)$.

При условии значения вероятности доверительного уровня, равного $P(p_r^*(t_j) -$

$-\Delta_{rj}^* < p_r(t_j) < p_r^*(t_j) + \Delta_{rj}^*) = 0,975$, оценку дисперсии погрешности измерительного прибора вычисляют по формуле:

$$\sigma_{0rj}^2 = \left(\frac{\Delta_{rj}^*}{2,23}\right)^2 \quad (4)$$

или рассчитывают среднюю дисперсию погрешности прибора на интервале замеров

$$\sigma_{0r}^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma_{0rj}^2. \quad (5)$$

В качестве критерия (для нормально распределенной случайной величины ξ_j) проверки гипотезы о том, что эмпирическая дисперсия S_ξ^2 сглаживания не превышает дисперсии измерений σ_{0r}^2 , используется неравенство:

$$S_\xi^2 \frac{\nu}{\chi_{1-\alpha/2}^2} < \sigma_{0r}^2, \quad (6)$$

на правах рекламы



Манометры ASHCROFT для применения в низкотемпературных условиях до -70°C

Мировой лидер по производству высококачественного контрольно-измерительного оборудования, компания ASHCROFT разработала и представила новое исполнение манометров модели T6500 из нержавеющей стали для применения в условиях низких температур до -70°C.



Особенностью этого исполнения является применение уплотнений из специального фторсиликонового эластомера и заполнение корпуса низкотемпературным силиконом, которое предотвращает внутреннее обледенение устройства и остается текучим при температуре до -70°C.

Возможны исполнения манометров модели T6500 с диапазонами измерения от -1/0 и до 0/1000 бар с классом точности 1% из нержавеющей стали для применения в условиях низких температур до -70°C.



Дополнительную информацию Вы можете найти на сайте официального дистрибьютора ООО «АЛЛ Импекс 2001» www.all-impex.ru, а также обратиться к специалистам компании. Тел. (495)-921-30-12, e-mail: info@all-impex.ru

где $v = m - 1$, $\chi_{1-\alpha/2}^2$ – квантили распределения χ^2 .

Гипотеза $S_\xi^2 < \sigma_{or}^2$ принимается, если выполняется неравенство (6).

2. Наличие систематических погрешностей показаний единичных датчиков может быть оценено на основании появления во временных рядах замеров устойчивых интервалов, на которых невязки $\xi_{ij} = (p_r^*(t_j) - \hat{p}_r(t_j))$, рассогласования замеров $p_r^*(t_j)$ и расчетных $\hat{p}_r(t_j)$ (по модели) значений параметра будут иметь статистически ненулевое математическое ожидание

$$\hat{m}_\xi = \frac{1}{n} \sum_j^n \xi_{ij}$$

Гипотеза о нулевом среднем $\hat{m}_\xi = 0$ принимается, если выполняются неравенства:

$$|\hat{m}_\xi| \leq t_{1-\alpha/2} \frac{S_\xi}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

$$|\hat{m}_\xi| \leq U_{1-\alpha/2} \frac{\sigma_\xi}{\sqrt{n}}. \quad (8)$$

Критерий (7) применяется, если дисперсия погрешности измерений σ_{or}^2 не известна, критерий (8) – если она известна.

3. Фильтрация аномальных выбросов показаний датчиков, которые могут быть обусловлены внезапным возникновением различных отрицательных эффектов в каналах связи или внешних импульсных воздействий на сами датчики. Для выявления выбросов, не обусловленных изменениями технологического процесса, могут применяться различные критерии и методы математической статистики, в частности метод Анскомба, критерий Диксона, а также методы, основанные на других статистических критериях, например Стьюдента [3].

Например, проверка гипотезы о наличии аномальных замеров методом Анскомба состоит в том, что k -й замер отбрасывается, если $|\xi_k| > c \cdot S_\xi$ где c вычисляется из выражения:

$$\left[\frac{m \cdot c^2 \cdot (v - 1)}{v \cdot (v - m \cdot c^2)} \right]^{1/2} \approx t_{1-\alpha/2}^{v-1}, \quad (9)$$

где $t_{1-\alpha/2}^{v-1}$ – распределение Стьюдента, $v = m - 1$.

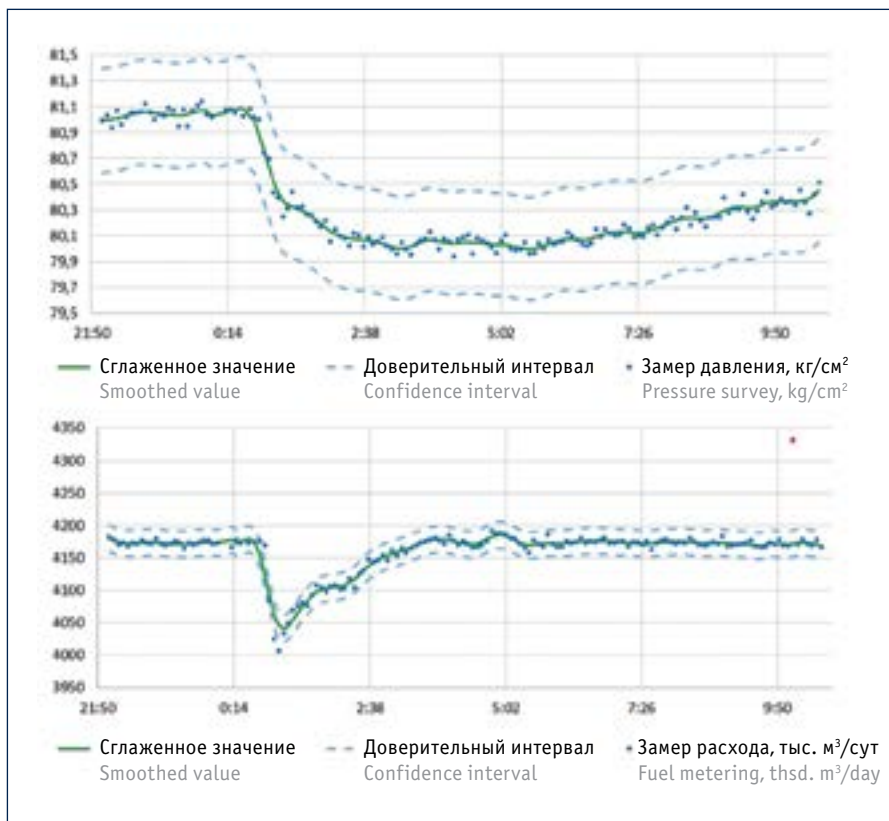


Рис. 3. Пример применения процедур повышения достоверности замеров на выходе магистрального газопровода «Ямал – Европа»

Fig. 3. Illustration of where the increased accuracy procedures of trunk gas pipeline “Yamal – Europe” exit measuring can be applied

Оставшаяся выборка δ_j рассматривается как вновь полученная.

Если дисперсия σ_{or}^2 задана, то величина c вычисляется через F -распределение:

$$c \approx \left(\frac{v}{m} \right)^{1/2} \left(\frac{3F_{1-q}}{(3F_{1-q} - 1)} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

где $q = \frac{v}{m} \sigma_{or}^2$, значение F_{1-q} задается при v степенях свободы.

Метод доверительного интервала исходит из предположения о нормальном распределении выборки невязок ξ_{ij} . Доверительный интервал оценки случайной величины ξ_{ij} :

$$\hat{m}_\xi - t_{1-\alpha/2} \frac{S_\xi}{\sqrt{n}} \leq \xi_{ij} \leq \hat{m}_\xi + t_{1-\alpha/2} \frac{S_\xi}{\sqrt{n}}, \quad (11)$$

$$\hat{m}_\xi - U_{1-\alpha/2} \frac{\sigma_{or}}{\sqrt{n}} \leq \xi_{ij} \leq \hat{m}_\xi + U_{1-\alpha/2} \frac{\sigma_{or}}{\sqrt{n}}. \quad (12)$$

Замер считается аномальным, если для невязки ξ_{ij} не выполняется проверяемое неравенство. Данный подход к фильтрации аномальных замеров обладает рядом недостатков:

- он позволяет статистически оценивать наличие одного или незначительного числа аномальных замеров в выборке, о которой достоверно известно, что она принадлежит нормальному распределению с условиями $(0, \sigma_{or}^2)$;

- возможно, аномальное значение измеряемого параметра обусловлено технологическим процессом (переключениями крановой системы, включениями/отключениями газоперекачивающего агрегата, изменениями объемов подачи и отбора газа и т. п.), а не ошибкой прибора. В этом случае такой параметр будет отброшен ошибочно.

В результате применения описанных процедур можно получить оценки детерминированной составляющей, тем самым снизив влияние погрешности исходных данных на адекватность результатов онлайн-моделирования. На рис. 3 представлен пример применения описанных процедур для обработки замеров выходных параметров магистрального газопровода «Ямал – Евро-



IX отраслевое совещание

«Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «Газпром»

12–16 ноября 2018 г.

Место проведения:
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
пос. Развилка

Участники: представители департаментов и дочерних обществ ПАО «Газпром», ведущих научно-исследовательских институтов, центров и вузов России, генподрядных и подрядных организаций по строительству и ремонту газопроводов, отечественных и зарубежных компаний – изготовителей труб и соединительных деталей трубопроводов, компаний – производителей сварочного оборудования и материалов, средств (приборов и материалов) неразрушающего контроля качества сварных соединений. Более 250 делегатов.

Предусмотрено проведение пленарного заседания, а также выставки «Сварочные материалы, оборудование и технологии».

По вопросам участия в совещании обращайтесь: +7 915 082 28 38, ermakova@neftegas.info, Екатерина Ермакова.

Организаторы: ПАО «Газпром», ООО «Медиа Миры»,
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Информационные партнеры:
Журнал «Территория НЕФТЕГАЗ»
Журнал «Газовая промышленность»



па». Как можно увидеть на графиках, использование методов позволило не только сгладить ряд, но и выявить явно недостоверный замер расхода.

ПРОЦЕДУРЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При моделировании режимов онлайн, и особенно при решении задач СППДР на основе результатов онлайн-моделирования, адекватность этих результатов приобретает особую значимость.

Оценка адекватности моделирования обычно проводится с использованием «избыточных» замеров, т. е. замеров параметров, которые не являются исходными данными для модели. Например, при расчете газотранспортной системы в качестве исходных данных для модели обычно используются показатели давления, расхода и температуры на входах и выходах системы. Замеры этих параметров в промежуточных точках системы, например на крановых площадках линейных участков, компрессорных цехов, в таком случае могут применяться для проверки адекватности модели. При онлайн-моделировании появляется возможность оценить адекватность модели в динамике, сравнить временные ряды замеров и расчетных параметров по избыточным данным. Модель может считаться адекватной, если:

- 1) отклонения расчетных значений каждого параметра от замеров являются случайными величинами (модель отражает динамику процесса);
- 2) математическое ожидание отклонений расчетных значений параметра от замеров статистически равно 0, т. е. модель отражает динамику процесса и не имеет систематического смещения;
- 3) отклонения расчетных значений параметра от замеров не содержат аномальных значений, т. е. модель отражает волновые процессы изменения режима;
- 4) отклонения расчетных значений параметра от замеров статистически не превышают погрешности измерительных устройств замеров параметра, т. е. погрешность модели статистически не превышает погрешности измерений параметров моделируемого процесса. Если выполняются все критерии, мож-

но принять гипотезу об адекватности модели фактическому режиму.

Каждый из критериев адекватности может быть сформулирован в форме статистической гипотезы и проверен соответствующими методами математической статистики. В работе [4] авторами приводится вариант применения методики оценки адекватности модели на примере моделирования режимов магистрального газопровода «Голубой поток». Данная методика универсальна и может быть применена к анализу адекватности результатов моделирования любого онлайн-технологического процесса, технологического объекта или системы.

Самостоятельной проблемой являются оценка и анализ причин неадекватности результатов моделирования, особенно с учетом того факта, что рассматриваемые технологические комплексы, такие как газодобывающие, газотранспортные, газораспределительные, обычно содержат сотни и тысячи контрольных точек замеров параметров газового потока, для части которых результаты могут соответствовать замерам, а для другой – значимо расходиться с замерами. Для расхождений могут производиться оценка значимости и выявляться факторы их появления, например:

- 1) могут иметь место постоянно недостоверные показания соответствующих замерных датчиков (в замерах есть систематические погрешности);
- 2) в модель может быть передана неправильная информация о составе и состояниях объектов газотранспортной системы. Требуется актуализация расчетной схемы, чтобы она соответствовала фактической технологической схеме системы;
- 3) в модель может быть передана неверная информация о паспортных или фактических параметрах технологических объектов газотранспортной системы: труб, газоперекачивающих агрегатов, аппаратов воздушного охлаждения, крановых систем и т. д. Требуется актуализация данных о параметрах объектов;
- 4) в моделируемом технологическом комплексе происходят штатные или нештатные процессы (изменения гидравлических характеристик объектов: тренды пропускной способности, газодинами-

ческие характеристики центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов, несанкционированные отборы и т. д.), которые не учитывались в модели; 5) для расчета параметров режима применяется модель, не соответствующая характеру фактического режима: например, режим нестационарный, а применялась стационарная модель; процесс неизотермический, а модель изотермическая; трубопроводы имеют значимые перепады высот, а модель построена для горизонтальных трубопроводов, и т. д.; 6) математическая модель требует проведения настройки (адаптации) к фактическим онлайн-режимам.

Основной целью адаптации моделей к заданным параметрам гидравлического режима является настройка расчетных режимов на фактические в соответствии с выбранными критериями, например:

$$F = \min_{\vec{a}} \left[\sum_{r=1}^{n_p} v_p \frac{(p_r^* - \hat{p}_r(\vec{a}))^2}{(p_r^*)^2} + \sum_{q=1}^{n_q} v_q \frac{(Q_q^* - \hat{Q}_q(\vec{a}))^2}{(Q_q^*)^2} + \sum_{r=1}^{n_T} v_T \frac{(T_r^* - \hat{T}_r(\vec{a}))^2}{(T_r^*)^2} \right], \quad (13)$$

где v_p, v_q, v_T – весовые коэффициенты; \vec{a} – вектор идентифицируемых эмпирических параметров модели газотранспортной системы; p_r^*, Q_q^*, T_r^* – замеры давления, расхода, температуры газа в контрольных точках газотранспортной системы; $\hat{p}_r(\vec{a}), \hat{Q}_q(\vec{a}), \hat{T}_r(\vec{a})$ – расчетные значения давления, расхода, температуры газа в контрольных точках системы. Средством адаптации моделей является идентификация различных эмпирических коэффициентов \vec{a} , всегда входящих в состав моделей технологических систем, значения которых достоверно не известны либо меняются в течение эксплуатации оборудования.

Примерами таких эмпирических коэффициентов \vec{a} , в частности, являются:

- коэффициент гидравлической эффективности или коэффициент эквивалентной шероховатости внутренней поверхности трубопроводов;
- интегральный коэффициент теплообмена трубопроводов с окружающей средой;



Рис. 4. Панель программы адаптации модели газотранспортной системы
 Fig. 4. Panel of model adjustment program for gas transport system

- интегральные поправки на газодинамические характеристики газоперекачивающих агрегатов компрессорных цехов;
- для аппаратов воздушного охлаждения обычно используют поправку к расчетному коэффициенту теплообмена;
- для кранов регуляторов или кранов редуцирования давления может использоваться поправка к эффективному открытому сечению и т. д.

Критерий (13) может быть минимизирован с помощью стандартных методов оптимизации, при этом надо учитывать, что функция $F(\vec{a})$ как по компонентам вектора оцениваемых параметров \vec{a} , так и по квадратам невязок давлению p , расходу газа q и температуре T может обладать плохими свойствами, в частности на порядки разной чувствительностью (так называемые овражные многомерные поверхности). Кроме того,

разные методы (градиентные, неградиентные) обладают разной эффективностью (скоростью сходимости к решению) на разных участках поверхности в зависимости от расстояния (близости) к точке оптимума. Поэтому при выборе численных методов минимизации критерия (13) следует также учитывать возможности комбинации и чередования различных численных методов, задание различных весовых коэффициентов компонент критерия (13) и даже выбора на каких-то начальных этапах процедуры очередности покоординатного спуска по параметрам сравнения p, q, T . От учета всех этих факторов существенно зависит соотношение точности решения задачи и требуемых для этого вычислительных затрат (время решения задачи), которые могут оказаться неприемлемыми. Решение проблемы выбора критерия рассогласования $F(\vec{a})$ множества эмпирических параметров модели \vec{a} численных методов решения задачи выходит за рамки данной статьи. На рис. 4 представлена панель программы адаптации модели газотранспортной системы, реализованной авторами в программно-вычислительном комплексе «Веста-онлайн».

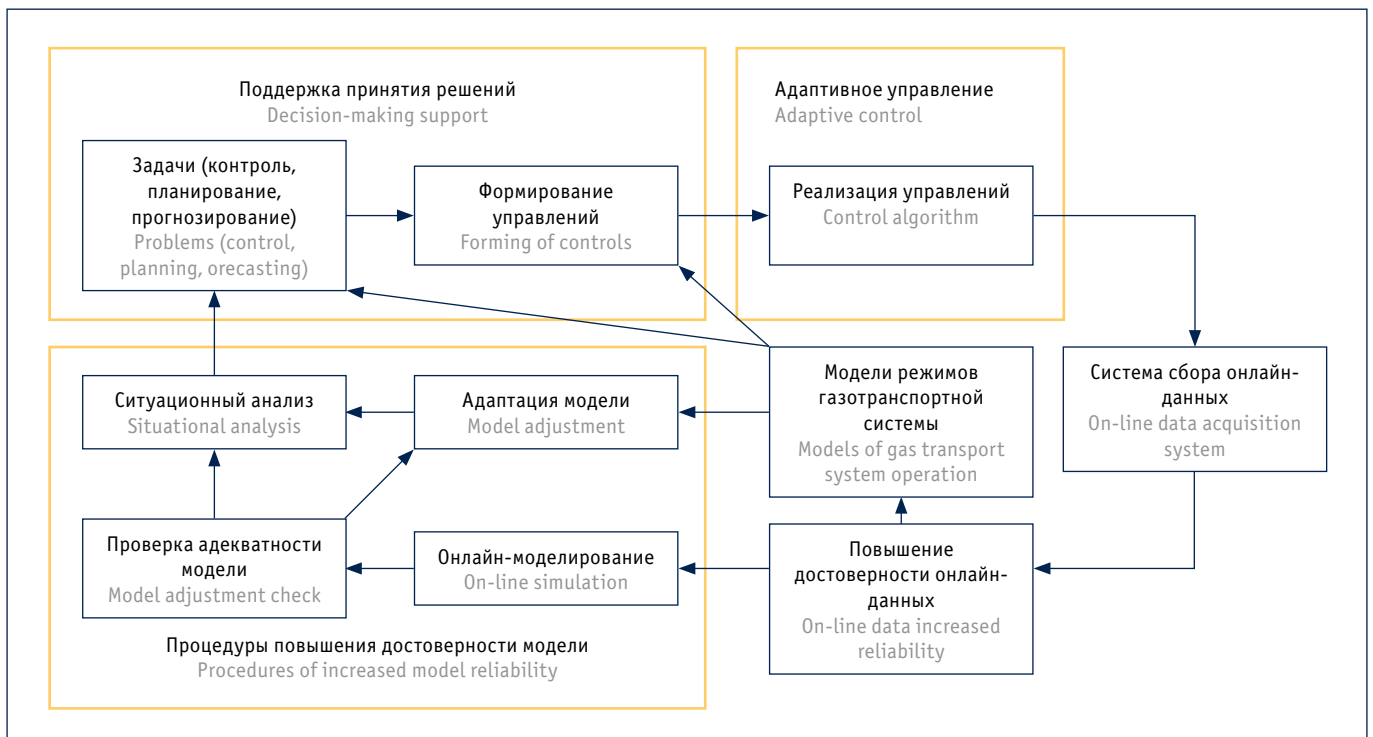


Рис. 5. Общая схема адекватного моделирования, планирования и управления онлайн-режимами газотранспортной системы
 Fig. 5. General arrangement of appropriate simulation, planning and control of on-line gas transport operations



Рис. 6. Пример подготовки замеров магистрального Северо-Европейского газопровода для моделирования
 Fig. 6. Illustration of preparation for the trunk North-European gas line measuring to carry out simulation

На данной панели показаны:

- список «Модель ТС», содержащий значения поправочных коэффициентов гидравлической эффективности $K_{эф}$ и теплообмена $K_{то}$ подсистем трубопроводов, диапазон изменения параметров;
- список «Модель крана», содержащий список кранов регуляторов и редуцирования давления газа, у которых показаны эффективный диаметр и текущее значение коэффициента гидравлического сопротивления;
- списки замеров и расчетных параметров: давление, расход, температура в узлах замеров для потребителей и поставщиков газа;
- списки замеров и расчетных параметров: давление, температура на входах и выходах компрессорного цеха, а также интегральные поправки на расчет политропического коэффициента полезного действия ($K_{кпд}$) и работу сжатия центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата компрессорного цеха ($K_{об}$). Поправочный коэффициент на степень сжатия (K_c) в данной версии программы не используется.

В группе «Максимальные отклонения от замеров» можно задать погрешность замеров по давлению P и расходу газа Q . Можно задать значение критерия завершения итерационной процедуры адаптации.

В результате решения задачи адаптации может выполняться идентификация не самих эмпирических коэффициентов моделей, а поправок (идентифицируемых параметров) к ним. При этом одна поправка может относиться не к одному, а к группе однотипных объектов, например ко всем трубопроводам линейной части между компрессорными станциями или ко всем газоперекачивающим агрегатам одного компрессорного цеха. На рис. 5 представлена общая схема процесса адекватного моделирования, планирования и управления онлайн-режимами газотранспортной системы. Основу схемы составляет система телеметрии сбора онлайн-замеров, которая является источником данных реального времени. Поступающие из системы замеры обрабатываются процедурами повышения достоверности данных, в результате формируются непрерывные оценки детерминированной составляю-

щей значений параметров. Эти оценки являются исходными данными для онлайн-моделирования, результаты которого проверяются на адекватность параметрам фактического режима. В случае появления значимых расхождений расчетных и замеренных данных выполняется ситуационный анализ возможных факторов, приводящих к неадекватности модели. Для получения адекватных результатов влияние этих факторов должно быть учтено в модели. При необходимости выполняется адаптация модели.

Адекватная модель используется для решения следующих задач поддержки принятия решений:

- контроль текущего режима;
- планирование управляющих воздействий;
- прогнозирование влияния воздействий на ход технологического процесса.

На основе решения этих задач формируются и реализуются диспетчерские управления объектами системы. Изменения режима вследствие управлений передаются в модель через систему сбора данных, и затем цикл повторяется.

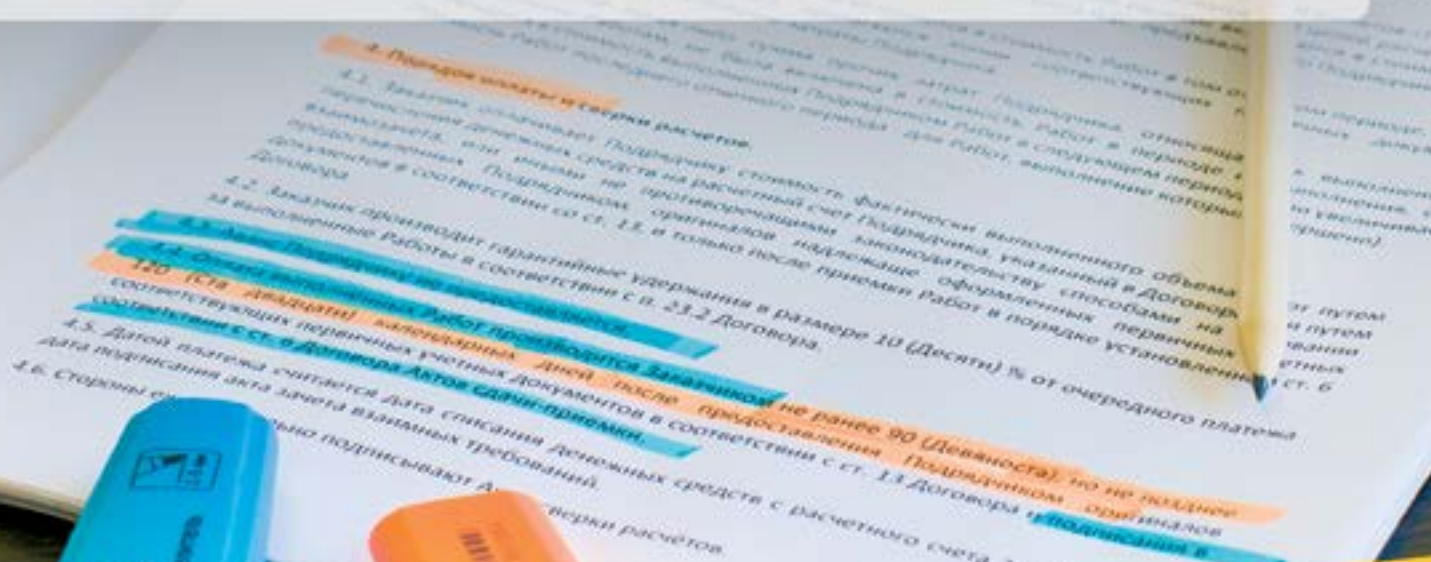
Работаете с крупным заказчиком?

Ждете оплаты?

Не ждите.

У вас есть **ОНЛАЙН ФАКТОРИНГ**

Осуществляйте поставки, выполняйте работы и услуги по контрактам и **ПОЛУЧАЙТЕ ДЕНЬГИ СРАЗУ**



 **открытие** | ФАКТОРИНГ

ОНЛАЙН ФАКТОРИНГ — простой и удобный инструмент беззалогового финансирования поставщика товаров, работ или услуг под уступку дебиторской задолженности

ООО «Открытие Факторинг», дочерняя компания ПАО Банк «ФК Открытие», 15432, Москва, Проспект Андропова, д. 18, корп. 6, БЦ «Немецкая гора». На правах рекламы

Укажите в заявке на сайте или назовите по телефону

ng2018

и получите выгодный тариф

openfactoring.ru

8 800 551 97 70

Таким образом, общая схема планирования онлайн-режима основана:

- на применении адекватной онлайн-модели текущего режима технологического комплекса;
- на применении нестационарной модели прогноза поведения системы: что будет, если произойдут те или иные события или будут применены те или иные управления;
- на результатах ситуационного анализа текущего и оперативного прогноза перспективного состояния системы;
- на результатах оперативного прогноза объемов поставок газа от смежных систем и объемов попутного потребления газа, его передачи в газораспределительные сети;
- на результатах оценки и прогноза изменений гидравлических характеристик линейной части и газоперекачивающего оборудования;
- на применении адекватных реальному технологическому процессу процедур автоматизированного и интерактивного многовариантного планирования режимов.

ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ОНЛАЙН-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сотрудники РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина уже третий десяток лет развивают программно-вычислительный комплекс «Веста», который успешно внедряется и эксплуатируется дочерними организациями ПАО «Газпром». Комплекс позволяет моделировать ста-

ционарные и нестационарные режимы газотранспортной системы, а также решать широкий набор режимно-технологических задач.

Описанные в работе процедуры нашли практическую реализацию в виде нового модуля «Веста-онлайн». Модуль позволяет решать такие задачи, как:

- интеграция с информационными системами газотранспортных и газодобывающих предприятий для обмена данными, в том числе замерами реального времени;
- предварительная подготовка замеров для онлайн-моделирования с помощью процедур повышения достоверности исходных данных;
- онлайн-моделирование режимов газотранспортной системы с применением нестационарной модели;
- анализ и оценка адекватности результатов онлайн-моделирования;
- адаптация математической модели к фактическим режимам газотранспортной системы;
- расчет аналитических показателей на основе онлайн-модели, в том числе запаса газа в системе, изменения запаса газа, баланса газа, товаротранспортной работы;
- представление информации о режиме и результатах моделирования в виде отчетных форм, графиков и т. д., а также визуализация информации непосредственно на экранных формах системы диспетчерского контроля и управления. На рис. 6 представлен пример предварительной подготовки онлайн-замеров

фактического режима Северо-Европейского газопровода для моделирования. Программно-вычислительный комплекс «Веста-онлайн» в настоящий момент эксплуатируется ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» и позволяет осуществлять онлайн-моделирование, решать задачи планирования режимов на основе онлайн-модели, а также рассчитывать онлайн балансовые показатели. Завершено внедрение комплекса «Веста-онлайн» для первых двух пусковых комплексов (9 линейно-производственных управлений), сейчас ведутся работы по реализации третьей очереди (5 ЛПУ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье методы повышения достоверности онлайн-данных и результатов моделирования режимов промысловых, магистральных, газораспределительных трубопроводных систем являются универсальными. В процессе апробации на реальных данных диспетчерских служб они продемонстрировали свою эффективность, позволяют повышать достоверность и адекватность результатов онлайн-моделирования сложных распределенных технологических комплексов. Однако многие проблемы, связанные с формализацией процедуры ситуационного анализа результатов неадекватного моделирования, а также оценки фактического состояния технологических объектов и системы в целом, остаются пока не решенными и являются предметом дальнейших исследований.

Литература:

1. СТО Газпром 8-005-2013. Диспетчерское управление. Инструменты диспетчерского управления. Системы поддержки принятия диспетчерских решений. Общие требования. М.: ОАО «Газпром», 2012. 26 с.
2. Голубятников Е.А., Сарданашвили С.А. Проблемы моделирования on-line режимов систем газоснабжения // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 4. С. 32–37.
3. Сарданашвили С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). М.: ФГУП «Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2005. 577 с.
4. Сарданашвили С.А., Самсонова В.В. Методы оценки адекватности расчетных режимов систем газоснабжения // Газовая промышленность. 2013. № 9 (695). С. 84–88.

References:

1. Company Standard (STO) Gazprom 8-005-2013. Dispatch Management. Dispatch Control Tools. Systems Support for the Adoption of Dispatch Solutions. General Requirements. Moscow: Gazprom JSC, 2012. 26 p. (In Russian)
2. Golubyatnikov Ye.A., Sardanashvili S.A. Problems of Gas Supply Systems On-Line Modes Modeling. Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory, 2015, No. 4. P. 32–37. (In Russian)
3. Sardanashvili S.A. Calculation Methods and Algorithms (Pipeline Gas Transportation). Moscow, FSUE "Oil and Gas" Publishing House of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2005. 577 p. (In Russian)
4. Sardanashvili S.A., Samsonova V.V. Methods for Assessing the Adequacy of the Design Regimes of Gas Supply Systems. Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry, 2013, No. 9 (695), P. 84–88. (In Russian)