

- мобильность – подключение клиентов к WebSCADA-серверу через Internet/Intranet позволяет им взаимодействовать с прикладной задачей автоматизации как с простой web или war-страницей;

- использование свободного программного обеспечения снижает финансовые затраты, необходимые для внедрения системы.

Тем не менее, имеется ряд недостатков:

- при коммутации пакетов данных нужна промежуточная буферизация, которая вносит в процесс доставки сообщений задержку, а при переполнении промежуточных буферов возможны потери данных;

- системы являются уязвимыми для кибератак, т. к. используются стандартные средства защиты – разграничение доступа пользователей с разными уровнями доступа данных, а также использование разных методов шифрования данных.

Анализ программно-инструментальных комплексов для реализации АСУЗ показал неоспоримые преимущества WebSCADA перед классическими SCADA-системами: кроссплатформенность, мобильность, использование бесплатного ПО. Целесообразно для дальнейших исследований использовать технологии WebSCADA.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (госконтракт 16-38-00628).*

#### Список литературы

1. Кудрявцева М.Е. Системы автоматизации зданий: внедрение и экономическая оценка // Риск: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2012. – № 2. – С. 260–263.
1. Чергинец О.А. Ресурсосберегающие технологий интеллектуальных зданий// Перспективное развитие науки, техники и технологий. – 2013. – С. 384–387.
2. SCADA-система Trace Mode / сост. И.П. Ефимов, Д.А. Солюянов. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 158 с.

УДК 004

## КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДОБЫЧИ НА СЛОЖНЫХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Чередниченко К.А., Семенов Н.М.  
Научный руководитель: Семенов Н.М.

*Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: kostya92\_18@mail.ru*

#### Введение

В настоящее время можно видеть быстрое развитие новых технологий связанных с производством нефти. В последнее десятилетие была разработана концепция интегрированных операций, что привело к улучшению операций, управлению месторождением, и производством в рамках математической оптимизации интегрированных моделей.

Данная работа развивает концепцию комплексной оптимизации добычи на сложных нефтяных месторождениях, которые имеют инфраструктуру со сложной степенью свободы маршрутизации, ограничениями емкости пласта, ограничения давлений скважины путем подачи газа. В качестве примера с доступными числовыми данными в работе рассматривается месторождение в Бразилии Urucu [2].

### Формулировка модели оптимизации производства

Месторождение нефти можно рассматривать как ориентированный граф, как показано на рис.1 [3]. Множество узлов  $N$  есть объединение множества скважин  $W = \{1, \dots, W\}$ , множество коллекторов  $M = \{1, \dots, M\}$ , множество сепараторов  $S = \{1, \dots, S\}$ , множество соединений к газопроводам  $C = \{1, \dots, C\}$ , и множество терминалов газопровода  $T = \{1, \dots, T\}$ .

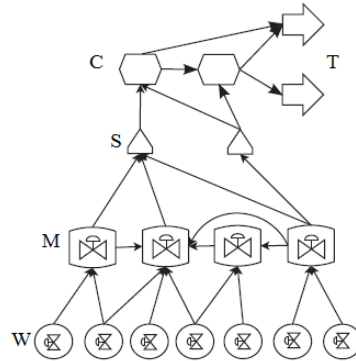


Рис. 1. Образец производственной сети

Многофазный поток жидкости через сеть узлов и трубопроводов можно описать следующими уравнениями

$$q_w = q_w(u_w), w \in W, \quad (1a)$$

$$q_i = \sum_{j:(i,j) \in P} q_{i,j}, i \in (N \setminus T \cup S), \quad (1b)$$

$$\varepsilon^s q_s = \sum_{j:(s,j) \in P} q_{s,j}, s \in S, \quad (1c)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in P} q_{i,j} = q_j, j \in (N \setminus W), \quad (1d)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in P} z_{i,j} \leq 1, i \in N, \quad (1e)$$

$$0 \leq q_{i,j} \leq q_{i,j}^{max} z_{i,j}, (i,j) \in P, \quad (1f)$$

где  $u_w$  – нормализованное забойное давление;  $q_w$  – вход потока в сеть из скважины  $w$  с характеристикой  $q_w(u_w)$ , которая является нелинейной функцией, относящиеся  $u_w$  к производству на каждой фазе;  $q_i$  – скорость трехфазного потока, протекающего через узел  $i$ ;  $q_{i,j}$  – скорость потока от трехфазного узла  $i$  до  $j$ ;  $z_{i,j}$  – бинарная переменная, которая принимает значение 1, если жидкость из узла  $i$  направлен на  $j$ , и 0 в противном случае;  $q_{i,j}^{max}$  – максимальная, пропускная способность трубопровода  $(i,j)$  для газа, нефти и воды;  $\varepsilon^s$  –  $R^{3 \times 3}$  матрица моделирования эффективности сепаратора  $s \in S$ .

Уравнение (1a) описывает добычу флюида. Уравнения (1b)–(1d) описывают баланс сохранения массы добытого флюида в сети. Неравенства (1e) и (1f) устанавливают, что каждому узлу в графе разрешено иметь только один выход.

Для описания потока жидкости от одного узла к нескольким узлам необходимы нелинейные модели, чтобы представить разделение потока нефти, поскольку поток в трубопроводах зависит от выходного давления, режима течения жидкости и геометрии оборудования [1]. Справедливым предположением является то, что добытый флюид сохраняет свой состав на всех выходах, что позволяет представить сетевое перераспределение потока в виде простых моделей.

Тем не менее, такие модели состоят из нелинейных отношений, которые требуют новых кусочно-линейных приближений. Чтобы избежать этих нелинейных моделей предложено для узлов разрешить иметь один выход, который описывается введенным неравенством (1e).

Ограничениями системы сбора на расход флюида являются:

$$\begin{aligned}\sum_{w \in W} q_w &\leq q^{max}, \\ q_i &\leq q^{i,max}, i \in N, \\ u_w^{min} &\leq u_w \leq u_w^{max}, w \in W,\end{aligned}$$

где  $q^{max}$  – максимальное производство для каждой фазы с учетом всех скважин в производственной сети. Если скважины производят газа (воду) посредством подземного конуса то, как правило, устанавливается максимальные ограничение на производство газа (воды);  $q^{i,max} = (q_g^{i,max}, q_o^{i,max}, q_w^{i,max})$  – максимальная пропускная способность узла  $i$  для трехфазного потока (газ, нефть вода).

Забойное давление связано с расходом жидкости.  $u_w^{min}$  – минимальное забойное давление которое рекомендуется инженером по разработке и эксплуатации месторождений. Минимальное забойное давление устанавливается, чтобы избежать эрозионных эффектов из-за высокой скорости жидкости. Путем ограничения забойного давления  $u_w^{max}$  снижается пластовое давление, что не допускает закрытия скважины.

Падение давления через трубопроводы должно быть промоделировано, чтобы гарантировать направление потока жидкости из за максимальных ограничений давления на технологических объектах.

Для моделирования ограничений давления, переменные абсолютного давления связаны с каждым узлом в сети производства. Падение давления через контролируемые трубопроводы также определены и контролируются. Поскольку давление в конечных пунктах газопроводов контролируются, то они считаются известными параметрами модели [2].

Для простоты, функция падения давления будет написана просто с точки зрения расхода жидкости  $\Delta p_{i,j}(q_{i,j})$  или более кратко  $\Delta p_{i,j}$ . Пусть  $z_{i,j}$  будет двоичной переменной, указывающей, является ли трубопровод активным, тогда падение давление и абсолютное давление могут быть связаны:

$$-L_p(1 - z_{i,j}) \leq p_i - p_j - \Delta p_{i,j} \leq U_p(1 - z_{i,j}), (i,j) \in P, i \notin W, \quad (2a)$$

Абсолютное давление на устье скважины рассчитывается как функция забойного давления.

Задаваемая переменная  $u_w$ , забойное давление и многофазный поток скважины  $W$  рассчитываются, делая возможным получение давление на устье  $p_w$  с помощью падения давления вдоль труб (VLP уравнений). Отсюда следует, что абсолютное давление и падение давления в сети моделируют с использованием следующих уравнений:

$$\begin{aligned}p_{i,j} &= \Delta p_{i,j}, (i,j) \in P \\ p_w &= p_w(u_w), w \in W \\ -L_p(1 - z_{i,j}) &\leq p_i - p_j - p_{i,j}, (i,j) \in P \\ p_i - p_j - p_{i,j} &\leq U_p(1 - z_{i,j}), (i,j) \in (P \setminus W_M)\end{aligned}$$

Ограничения давления затем добавляют к системе следующим образом:

$$p_i \leq p_i^{max}, i \in (S \cup M), \quad (3a)$$

$$p_s^{min} \leq p_s, s \in S, \quad (3b)$$

$$p_m + p_{w,m} - L_p(1 - z_{w,m}) \leq p_w^{max}, (w, m) \in W_M, \quad (3c)$$

$$p_m + p_{w,m} - L_p(1 - z_{w,m}) \leq p_w, (w, m) \in W_M, \quad (3d)$$

где  $p_i$  – абсолютное давление в узле  $i$ ;  $p_{i,j}$  – падение давления в трубопроводе от  $i$  до  $j$ ;  $p_t$  – контролируемое абсолютное давление в точке терминала трубопровода  $t$ ;  $p_i^{max}$  – максимальное абсолютное давление допускаемое для узла  $i$ ;  $p_s^{min}$  – минимальное абсолютное давление,

позволяемое сепаратором  $s$ ;  $p_w^{max}$  – максимальное абсолютное допустимое давление вниз по течению подсоса скважин  $w$ .

Ограничения (3a) – пределы (3c) – пределы давления состояния в сетевых элементах, в то время (3d) гарантирует направление потока через штуцер.

### Постановка задачи

Задача оптимизации производства с учетом ограничений по потоку жидкостей, давлений и маршрутов определяется следующим образом

$$\begin{aligned} p: \max \sum_{w \in W} q_w^0, \\ \text{s. t. : } q &\leftarrow F_M(u, z), \\ F_C(q, u) &\leq 0, \\ p &\leftarrow P_M(q, z), \\ P_C(p, z) &\leq 0, \end{aligned}$$

где  $u, z, q$  и  $p$  векторы, группирующие нормализованные давление столба жидкости в скважине, решения о маршрутизации, фазовые скорости, и переменные давления;  $F_M$  – компактная форма представления уравнений модели потока коллектора;  $F_C$  является компактная форма, представляющая ограничения потока сепаратора с указанием ограничения;  $P_M$  представляет собой моделирование давления для узлов;  $P_C$  представляет ограничения давления.

### Заключение

В статье представлена постановка задачи оптимизации для старых нефтяных месторождений, таких как Угуси. Такие месторождения имеют скважины, дающие продукцию с появлением газового конуса, ограничивающего возможности добычи и имеют сложную инфраструктуру трубопроводов с коллекторами, сепараторами, и соединениями газопроводов.

Оптимизация может быть использована в качестве инструмента поддержки принятия решений для выполнения ежедневного планирования, когда скважины должны пройти тесты по добыче.

### Список литературы

1. Kosmidis B., Perkins J.D., Pistikopoulos E.H. Оптимизация нефтяной скважины. Распределение скорости в нефтяных месторождениях // *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004. – 534 с.
2. Ван П., Литвак М., и Азиз К. Оптимизация производства старых месторождений // *In Proc. 17th world petroleum congress*. Brazil: Rio de Janeiro, 2002. – 102 с.
3. Аларкон Г.А., Торрес С.Ф., Гомес Л.Е. Глобальная оптимизация распределения газа в группе скважин в области искусственного подъема с использованием нелинейного программирования с ограничениями // *Journal of Energy Resources Technology*, 2002. – 268 с.