

Задачи оптимизации на конечных множествах в проектировании сетей промышленного сбора и подготовки продукции скважин на газовых месторождениях

О.Ю. Першин (АО «Хоневелл»)

Рассматриваются задачи синтеза оптимальных графов трубопроводных сетей сбора и промышленного транспорта продукции скважин на газовых месторождениях. Даются формулировки соответствующих экстремальных задач на конечных множествах, обсуждаются их особенности и методы решения. Предлагается единая комбинаторная форма для описания рассматриваемого класса математических задач, позволяющая обосновать единый подход к решению практических задач в зависимости от промысловых условий.

Ключевые слова: газовые месторождения, оптимальное проектирование сетей, экстремальные задачи на конечных множествах.

Введение

В работе [1] предлагался обзор по тематике «интеллектуальное месторождение», где основной акцент делался на использовании современных средств информатизации и автоматизации технологических процессов на нефтяных промыслах. В данной работе в рамках этого же актуального направления рассматриваются вопросы использования современных методов оптимального синтеза сетей на этапе технико-экономического обоснования (ТЭО) обустройства газовых месторождений.

Обычные отраслевые методики расчета затрат на обустройство газовых промыслов на этапе выполнения ТЭО разработки месторождений основаны на нормативном методе с использованием удельных затрат на одну скважину или единицу добычи продукции (в зависимости от вида затрат) с учетом районных корректирующих коэффициентов. После отмены единых государственных расценок на оборудование и строительно-монтажные работы, которые служили обоснованием таких нормативов, точность расчетов, и ранее носивших очень приближенный характер, еще более снизилась. Другим принципиальным недостатком нормативного подхода служит невозможность сравнения альтернативных вариантов схем наземных промысловых сетей коммуникаций с целью выбора наиболее экономичных на этапе инвестиционного проектирования.

Принципиально более достоверным является расчет капитальных затрат на обустройство промысла, основанный на непосредственном нахождении оптимальных решений по проектированию наземных технологических сетей промысловых коммуника-

ций, позволяющих реализовать тот или иной вариант проекта разработки месторождения углеводородов, предложенный геологами. Еще одним достоинством подобного подхода является то, что в результате его применения мы получаем вариант схемы наземных коммуникаций, который может служить основой для детальных расчетов на этапе рабочего проектирования.

Необходимым условием использования подобной методики является наличие эффективного вычислительного аппарата для решения экстремальных задач проектирования наземных сетей коммуникаций на стадии разработки ТЭО. Рассмотрению именно этой проблемы и посвящена данная работа. Направленность обсуждаемых в статье методов на их использование на стадии разработки ТЭО определяет их отличие от вычислительных методов, традиционно применяемых при проектировании систем наземного обустройства промыслов.

В статье предлагаются постановки задач оптимального синтеза промысловых трубопроводных сетей и формулируются экстремальные задачи на конечных множествах для их решения. Анализируется специфика этих задач и обсуждаются возможные алгоритмы их решения на основе специальных методов целочисленного математического программирования.

Описание объекта

Современные технологические системы сбора и промышленной подготовки скважинной продукции (СБиПП) на газовых месторождениях служат для реализации двух производственных функций:

- транспортировки продукции от добывающих скважин до центрального промыслового сборного пункта, где газ поступает непосредственно в головную компрессорную станцию магистрального газопровода;
- промышленной подготовки добываемого природного газа с целью доведения его до товарных кондиций — характеристик, предъявляемых к газу, транспортируемому по магистральным трубопроводам.

Система состоит из сосредоточенных производственных объектов, на которых выполняются технологические операции по промышленной подготовке газа [2], и связывающей их сети трубопроводов.

В процессе доведения скважинного газа до товарных кондиций решаются задачи очистки от механи-

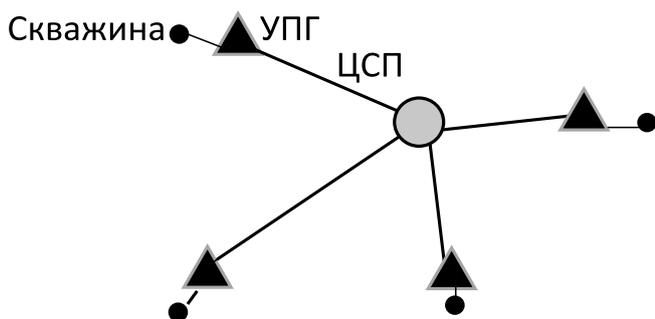


Рис. 1. Индивидуальная схема сбора

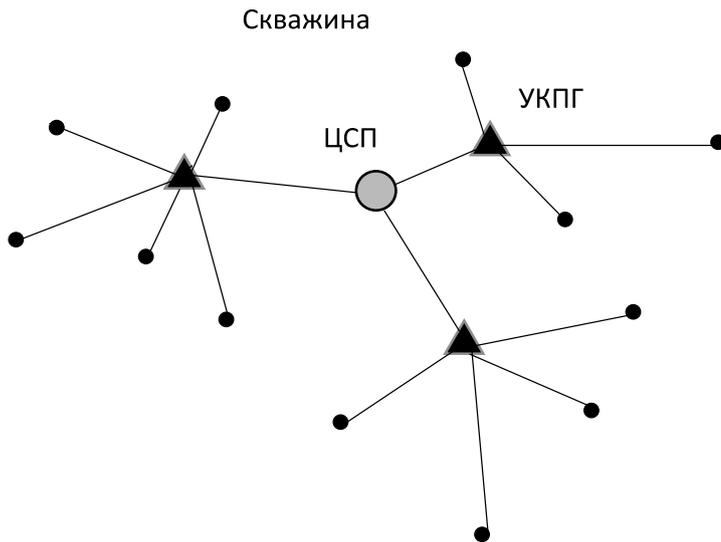


Рис. 2. Децентрализованная схема сбора

ческих примесей, паров воды, тяжелых углеводородов, сероводорода, углекислого газа.

С точки зрения технологических схем современные системы сбора и промышленной подготовки разделяются на индивидуальные, групповые и централизованные системы.

При *индивидуальной системе сбора* (рис. 1) каждая скважина имеет свой технологический комплекс для предварительной промышленной подготовки газа УПГ (установка предварительной подготовки газа). После УПГ газ либо по индивидуальным трубопроводам, либо по коллекторной сети поступает на центральный сборный пункт (ЦСП), где газ окончательно доводится до товарных кондиций и передается в головные сооружения магистрального газопровода. Подобные системы, как правило, используются на небольших месторождениях.

При *децентрализованной или групповой системе сбора* (рис. 2) наиболее распространенной в настоящее время, добываемый на скважинах газ поступает на групповые сборные пункты (ГСП), на которых располагаются технологические устройства для комплексной промышленной подготовки газа УКПГ (установка комплексной подготовки газа), и далее подготовленный газ транспортируется на ЦСП.

При *централизованной системе сбора* (рис. 3) все технологические устройства для промышленной под-

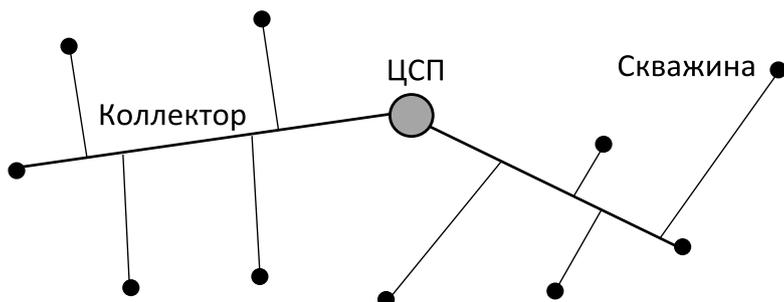


Рис. 3. Централизованная схема сбора

готовки газа сосредоточены на единой производственной площадке — центральном сборном пункте (ЦСП). Газ со скважин по промышленной газосборной коллекторной сети поступает на ЦПС, где выполняются все технологические операции и подготовленный газ поступает в магистральные газопроводы.

Нужно также иметь в виду, что на отдельных месторождениях могут использоваться смешанные схемы СБиПП.

Постановка задачи синтеза графа промышленной трубопроводной сети при групповой системе сбора

Для разработки методики оптимального синтеза графов трубопроводных сетей СБиПП воспользуемся подходом, аналогичным предложенному ранее для синтеза сетей сбора и промышленной подготовки продукции на нефтяных промыслах [3].

Рассмотрим децентрализованную схему сбора с использованием индивидуальных трубопроводов от ГСП до ЦСП. Данная схема широко распространена в настоящее время в России на газовых месторождениях и удобна для иллюстрации возможностей и техники использования предлагаемых оптимизационных методов для синтеза графа сети.

При использовании этой схемы (рис. 2) продукция скважины поступает по индивидуальному трубопроводу (шлейфу) на групповой сборный пункт, на котором располагается УКПГ. Группа скважин, относящихся к одному сборному пункту, образует «куст». Все скважины одного куста обслуживаются в одном УКПГ и каждая УКПГ обслуживает скважины только своего куста. После УКПГ газ, доведенный до товарных кондиций, поступает по индивидуальному трубопроводу в ЦПС.

В общем случае, чтобы спроектировать трубопроводную промышленную сеть нужно решить три взаимосвязанные задачи: разбить множество добывающих скважин на кусты, обслуживаемые на одной кустовой площадке, и определить координаты последней; спроектировать коллекторную промышленную сеть, связывающую кустовые площадки с ЦСП; рассчитать диаметры всех трубопроводов. В случае децентрализованной схемы промышленного газосбора

задача упрощается при наличии условия об использовании индивидуальных трубопроводов от каждой кустовой площадки до ЦПС, ибо в данном случае не требуется решать задачу синтеза графа коллекторной сети, связывающей кустовые площадки с центральным пунктом сбора. Также упрощается задача расчета диаметров трубопроводов, так как каждый трубопровод между сосредоточенными промышленными объектами может рассчитываться независимо по соответствующим формулам (1)

[2, 4] для расчета линейных участков газовых трубопроводов:

$$F(\Delta p, q, l, d) = 0, \quad (1)$$

где Δp — падение давления на рассчитываемом линейном участке газопровода, q — величина потока транспортируемого газа, l — длина участка, d — искомый диаметр.

Получение конкретного вида соотношения (1) для данного месторождения — это самостоятельная задача, но здесь и далее предполагается, что это соотношение известно и является входной информацией для рассматриваемой задачи синтеза сети.

Формулировка оптимизационной задачи

Обычно место расположения ЦСП известно, поскольку производственная площадка ЦСП совмещается с головными сооружениями магистрального газопровода. Следовательно, для синтеза графа трубопроводной сети достаточно определить места размещения ГСП и разбить все множество скважин на кусты, обслуживаемые в ГСП, единственной для всех скважин данного куста. Сформулируем оптимизационную задачу «Кустование» при условии, что объекты располагаются на плоскости, то есть справедлива евклидова метрика.

Задача «Кустование» формулируется в виде известной задачи о " m " центрах на плоскости [5].

Задача о " m " центрах на плоскости

На плоскости задано множество A точек $a_i = \{x_i, y_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, каждой из которых приписан неотрицательный вес w_i . Требуется определить положение на плоскости m центров $d_\tau = \{x_{i+\tau}, y_{i+\tau}\}$, $\tau = 1, 2, \dots, m$, для которых

$$F = \sum_{\tau=1}^m \sum_{a_i \in A_\tau} w_i \|a_i - d_\tau\| \longrightarrow \min$$

при условии, что каждая точка a_i из множества A соединена с одним и только одним центром d_τ .

Здесь: $\|a_i - d_\tau\| = \sqrt{(x_i - x_{i+\tau})^2 + (y_i - y_{i+\tau})^2}$.

Число ГСП m обычно выбирается, исходя из максимального числа скважин, обслуживаемых одной ГС. При необходимости на практике задача может также просчитываться для каждого значения m из некоторого интервала возможных значений.

Пример искомой сети при $n = 7$, $m = 2$ показан на рис. 4.

При $m = 1$, то есть при поиске координат единственного центра, минимизирующих сумму взвешенных расстояний от центра до заданного множества точек, данная задача представляет собой классическую задачу Штейнера — Вебера, для решения которой существует эффективный градиентный алгоритм [6].

Представим задачу о " m " центрах при $m > 1$ в комбинаторной форме.

Пусть ξ есть некоторое разбиение точек множества A на p непересекающихся подмножеств A_τ , каждое из которых включает

*Наука — это спектральный анализ;
искусство — синтез света.*
Карл Краус

лишь те точки, которые соединены с одним и тем же центром d_τ .

При известном разбиении ξ задача определения положения на плоскости " m " центров распадается на " m " отдельных задач нахождения положения единственного центра для данного подмножества вершин A_τ , то есть на " m " отдельных задач Штейнера — Вебера.

Обозначив значение целевой функции для экстремального решения отдельной задачи Штейнера — Вебера при известном разбиении ξ через $F_\tau(\xi)$, получим выражение для целевой функции задачи о " m " центрах:

$$F(\xi) = \sum_{\tau=1}^m F_\tau(\xi).$$

Теперь задача о " m " центрах может быть записана следующим образом.

На конечном множестве Ξ допустимых разбиений ξ требуется найти такое разбиение ξ^0 , для которого

$$F(\xi^0) = \min \{F(\xi), \xi \in \Xi\}. \quad (3)$$

Данная задача является *NP — трудной* [7], то есть относится к классу математических задач, для которых в настоящее время принята гипотеза, что для них не существует эффективных методов решения, (методов решения с полиномиальной оценкой сложности). Для ее точного решения предложен алгоритм метода ветвей и границ (МВ и Г) для задач средней размерности (примерно, до 50 вершин) [8] и эвристический алгоритм Купера для задач большой размерности [5].

На практике в условия задачи об " m " центрах могут добавляться ограничения на максимальное число скважин в одном кусте, что не влияет на применимость разработанных алгоритмов МВ и Г, а эвристический алгоритм требует незначительной модификации.

После нахождения координат ГСП и распределения по ним скважин надо определить диаметры шлейфов и трубопроводов, по которым транспортируется газ от ГСП до ЦПС. Так как по предположению газ в обоих случаях транспортируется по индивидуальным трубопроводам, то выбор минимальных по стоимости трубопроводов определяется по следующей простой процедуре: для каждого трубопровода находится минимальное число d_{min} из заданного мно-

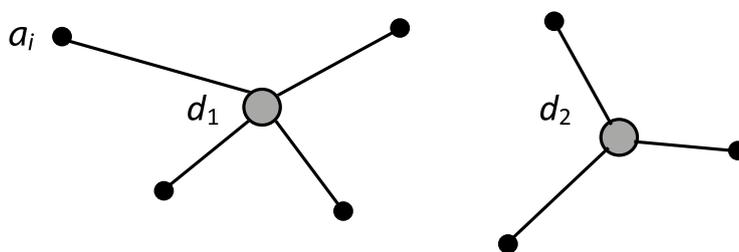


Рис. 4. Пример сети при $n = 7$, $m = 2$

жества D возможных диаметров, для которых выполняются соотношения

$$F(\Delta p, q, l, d) = 0, \\ \Delta p \leq [\Delta p],$$

где $F(\cdot)$ — заданная функция, $[\Delta p]$ — заданное максимальное допустимое падение давления на рассчитываемом трубопроводе длиной l, q — известная величина потока по трубопроводу.

Варианты оптимизационных постановок при решении практических задач

Наряду с задачей о " m " центрах на плоскости при решении практических задач в зависимости от условий на конкретных месторождениях возможно использование и других формальных постановок экстремальных задач.

Например, в некоторых случаях задается условие, что ГСП могут размещаться не в любой точке плоскости, а только на местах расположения скважин. Для решения этой модификации задачи может быть применима та же комбинаторная форма (2) — (3) с той особенностью, что в этом случае нахождение величины $F_T(\xi)$ упрощается. Данная задача решается перебором всех вершин множества A_T в качестве возможных мест размещения единственного центра и выбором той вершины, для которой сумма расстояний от всех остальных вершин минимальна. Соответственно, $F_T(\xi)$ есть значение этой суммы. Очевидно, что требование выполнения евклидовой метрики в этом случае необязательно, а стоимость строительства линии коммуникаций между двумя вершинами может рассчитываться и задаваться с учетом рельефа и особенностей местности.

При этом задача остается *NP — трудной*.

Рассмотрим случай, когда ставится задача минимизации длины коридоров коммуникаций при условии, что трубопроводы укладываются в траншее параллельными нитями и слияние коридоров возможно только в точках, где расположены скважины. Подобные требования могут иметь место при обустройстве промыслов в труднодоступных районах, где высока стоимость прокладки траншей и сооружения площадок для обустройства скважин. При такой постановке задачи требование выполнения евклидовой метрики также необязательно.

Сформулируем задачу в виде экстремальной задачи о m кратчайших деревьях.

Задан граф $G = \{A, E\}$, $A = \{a_i\}$, где каждому ребру приписан вес w_{ij} .

Здесь A — множество скважин, ребро e_{ij} — возможная линия коридора коммуникаций между скважинами a_i и a_j , w_{ij} — стоимость прокладки коридора. Задано m — число ГСП и t — максимальное число скважин, обслуживаемых в одном кусте.

Задача о " m " кратчайших деревьях

Требуется разбить граф G на m непересекающихся связанных подграфов $G_\tau = \{A_\tau, E_\tau\}$, $m = 1, 2, \dots, m$, та-

ким образом, чтобы при выполнении ограничения на максимальное число вершин t в каждом множестве A_τ суммарная стоимость ребер всех подграфов G_τ была минимальна.

Очевидно, что каждый подграф G_τ будет деревом.

Сформулируем данную задачу в комбинаторной форме, аналогичной (2) — (3).

Пусть ξ есть некоторое разбиение вершин множества A на p непересекающихся подмножеств A_τ . Для данного разбиения ξ задача состоит в решении m задач построения кратчайшего дерева для каждого отдельного подграфа G_τ . Обозначив сумму весов ребер кратчайшего дерева подграфа G_τ через $F_\tau(\xi)$, получим формулировку задачи о построении m кратчайших деревьев в следующей комбинаторной форме.

На конечном множестве Ξ допустимых разбиений ξ требуется найти такое разбиение ξ^0 , для которого

$$F(\xi^0) = \min \{F(\xi), \xi \in \Xi\},$$

где

$$F(\xi) = \sum_{\tau=1}^m F_\tau(\xi).$$

Данная задача, как и задача об m центрах является *NP — трудной*. Для ее точного решения предложен алгоритм метода ветвей и границ, а также его модификация для приближенного решения [10].

После построения m фрагментов газосборной сети в виде кратчайших деревьев надо выбрать на каждом дереве вершину (скважину), на которой будет расположена ГСП. Выбор места расположения ГСП не влияет на суммарную длину коридоров коммуникаций, поэтому при выборе указанной вершины могут быть использованы дополнительные критерии. Например, в качестве критерия выбора вершины для размещения ГСП может быть выбрана медиана дерева. Напомним, что медианой графа называется вершина, сумма расстояний до которой от остальных вершин графа минимальна. Данный критерий характеризует суммарное падение давлений на шлейфах скважин. Другим критерием может быть минимизация падения давления на шлейфе той скважины, для которой это падение наибольшее среди всех скважин данного фрагмента. Очевидно, подобные задачи размещения ГСП могут быть решены простым перебором скважин отдельного фрагмента с использованием уравнения (1).

Обсудим возможности использования оптимизационных моделей для синтеза промысловых сетей при индивидуальной и централизованной схемах сбора.

В случае индивидуальной технологической схемы сбора граф трубопроводной сети полностью определен, так как каждая скважинная УПГ непосредственно связана с ЦСП индивидуальным трубопроводом.

В случае централизованной схемы сбора постановка задачи определяется формой коллектора, связывающего скважины с ЦСП. В настоящее время существуют различные формы коллекторов [11], за-

висящие от условий на конкретном промысле, поэтому без учета конкретной формы коллектора нельзя дать универсальную формулировку оптимизационной задачи, содержательную с точки зрения разработки алгоритма решения.

При рассмотрении вышеприведенных математических моделей по умолчанию предполагалось, что решаются задачи для новых месторождений, не имеющих построенных фрагментов промысловой инфраструктуры. Но легко видеть, что описанные модели применимы и к задачам «допроектирования» промыслового обустройства, имеющим место при развитии существующих трубопроводных сетей. При этом соответственно уменьшается размерность переборных задач.

Заключение

В работе рассмотрен метод расчета затрат на строительство сетей сбора продукции скважин на газовых промыслах с использованием специальных экстремальных задач на конечных множествах, описывающих соответствующие практические задачи синтеза трубопроводных сетей. Данный метод позволяет повысить точность расчетов на стадии разработки ТЭО газовых промыслов и предложить варианты схем сетей трубопроводов для более детальных расчетов на стадии рабочего проектирования. Математическая специфика предложенных экстремальных задач, описывающих практические задачи при различных условиях на промыслах, позволяет представить их в единой комбинаторной форме, что в свою очередь

позволяет обосновать общую вычислительную схему для их решения.

Список литературы

1. Владов Р.А., Першин О.Ю. Интегрированное отраслевое решение для добычи нефти и газа «Интеллектуальное месторождение» // Автоматизация в промышленности. 2015. №4. стр. 59 - 62.
2. Шешуков Н.Л. Сбор и подготовка продукции газовых и газоконденсатных месторождений. Тюменский государственный нефтегазовый университет. Тюмень. 2013.
3. Першин О.Ю. Экстремальные задачи на конечных множествах в проектировании нефтегазосборных сетей // Автоматика, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2017. №5. стр. 34 - 39.
4. Бекиров Т.М., Шаталов А.Т. Сбор и подготовка к транспорту природных газов. М. Недра. 1986. 261 с.
5. Cooper L. Heuristic methods for location-allocation problems. SIAM Rev. 1964. №6. p.37-53.
6. Бер А.М., Белов Е.Н., Поляк Б.Т. О некоторых задачах оптимизации сетей. В кн. «Вычислительные методы и программирование». Вып. 5. МГУ, с. 115 - 123. 1966.
7. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М. Мир, 1982.
8. Першин О.Ю. Синтез оптимальных радиальных сетей, I//Изв. АН СССР, Техническая кибернетика. 1985. № 2. С. 107-112.
9. Бер А.М., Белов Е.Н., Поляк Б.Т. О некоторых задачах оптимизации сетей. В кн. «Вычислительные методы и программирование». Вып. 5. МГУ. С. 115- 123, 1966 г.
10. Першин О.Ю. Оптимальное проектирование древовидных коммуникационных сетей // Техническая кибернетика. 1978. 2. 1978. стр. 18 - 28.
11. Чухарева Н.В., Рудаченко А.В., Бархатов А.Ф., Федин Д.В. Транспорт скважинной продукции. Изд. Томского политехнического университета. 2011.

Першин Олег Юрьевич — д-р техн. наук, проф. консультант по стратегии и развитию АО «Хоневелл».
 Контактный телефон (985) 999-43-20.
 E-mail: pershino@mail.ru

НОВЫЕ КНИГИ

Э.Л. Ицкович Особенности современных АСУТП.
 Изд-во ИПУ РАН. 2017 г. 522 стр.

В книге рассматриваются задачи перспективной автоматизации производственных объектов предприятий технологических отраслей.

Анализируются современные технические и программные средства автоматизации производственных объектов: полевого уровня (датчики и исполнительные комплексы); промышленного уровня (контроллеры); информационного уровня (SCADA-программы); а также типовые цифровые сети, соединяющие компоненты систем автоматизации.

Выделяются варианты ПТК и распределенных систем управления (PCY). Приводятся рациональные методы построения и особенности функционирования АСУТП: создание концепции и планирование работ по автоматизации технологических агрегатов; разработка технических требований на создание АСУТП и организация тендера на выбор исполнителей; организация работ по проектированию, внедрению и эксплуатации АСУТП. Описываются направления развития средств и систем автоматизации и перспективные алгоритмы автоматического контроля, учета и управления работой технологического агрегата.

Рассматриваются важные для эффективного функционирования АСУТП: способы взаимодействия систем автоматизации

с операторами технологических агрегатов; мероприятия по рационализации функционирования персонала, управляющего производственными объектами и обслуживающего их системы автоматизации; методы защиты средств и систем автоматизации от воздействий внешней среды и кибератак; необходимые решения по преодолению типичных недостатков построения, внедрения и функционирования АСУТП на российских предприятиях.

Изложение материала рассчитано на сотрудников служб КИПиА предприятий, на специалистов по автоматизации проектных организаций, на разработчиков АСУТП, на системных интеграторов в области автоматизации производства предприятий технологических отраслей.

Книга будет полезна преподавателям, аспирантам, научным работникам, специализирующимся в области автоматизации производства предприятий технологических и энергетических отраслей, поскольку в ней дан современный анализ состояния в области автоматизации производственных объектов, рассмотрены перспективы его развития и приведены рациональные методы решения задач, касающихся планирования, построения, внедрения, эксплуатации АСУТП. Она может быть использована в качестве учебного пособия по курсу автоматизации производства.