

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Применение электронных вычислительных машин для решения задач нестационарного движения газа по магистральным газопроводам и системам газопроводов

Руководитель — доктор технических наук, профессор Е. М. Минский, МОСКВА — 1964

XXII съезд КПСС поставил перед советским народом блестящие перспективы построения коммунистического общества. «Построение коммунистического общества стало непосредственной практической задачей советского народа», — говорится в Программе Коммунистической партии Советского Союза. Большая роль в создании материально-технической базы коммунизма отводится развитию газовой промышленности. «Будет последовательно проводиться линия на преимущественное развитие добычи нефти и газа с возрастающим их использованием как сырья для химических производств».

Потенциальные запасы газа в СССР в настоящее время составляют 60 триллионов м³, или в 2 раза больше, чем в США. Свыше 40% прогнозных запасов газа находится в окраинных районах СССР. Для переброски огромных объемов газа необходим гигантский размах трубопроводного строительства. Отдельные газопроводы будут соединяться в единую систему газоснабжения европейской части СССР, Урала, республик Средней Азии и прилегающих к ним районов Сибири.

Небывалого размаха достигло трубопроводное строительство в настоящее время. Только в 1963 году построено и введено в действие около 7000 километров трубопроводов. Очень высока экономическая эффективность построенных и введенных в действие магистральных газопроводов.

Магистральные газопроводы являются металлоемкими и дорогостоящими сооружениями. При проектировании их необходимо искать возможно более оптимальные варианты транспорта газа, т. е. минимум расхода металла и мощности компрессорных станций, минимум затрат на сооружение и эксплуатацию при обеспечении заданной производительности газопровода.

До последнего времени гидравлический расчет газопроводов проводился при условии стационарности течения газа по ним. В действительности же происходит резкое колебание потребления газа не только в различные времена года, но и в различные часы суток. Эти колебания расхода газа на конце газопровода создают условия нестационарности течения газа, особенно в концевых участках газопровода. Поэтому при проектировании магистральных газопроводов должны учитываться условия

неравномерности потребления газа. Для этого необходимо изучение нестационарного течения газа в магистральных газопроводах, которое математически описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Изучение нестационарного течения газа в газопроводе при заданном графике потребления газа во времени и условия подачи газа в газопровод может давать ответы на многие важные инженерные вопросы проектирования и эксплуатации систем газоснабжения.

Диссертация посвящена вопросам использования электронных вычислительных машин для расчетов нестационарного течения газа по газопроводам и системам газопроводов, а также стационарного течения газа по газовым сетям. При исследовании газосборных сетей производится расчет работы всей сложной системы «пласт — скважины — газосборная сеть».

Диссертация состоит из трех глав. В первой главе излагаются методы расчета нестационарного течения газа по газопроводу на электронных вычислительных машинах. Нестационарное изотермическое движение газа по длинному газопроводу описывается нелинейной системой уравнений в частных производных параболического типа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0 \\ \left| \frac{\partial P^2}{\partial x} \right| &= Q^2 \\ 0 \leq x \leq 1, \end{aligned} \quad (1)$$

записанной в безразмерных переменных. В системе уравнений (1):

P — среднее по сечению трубы давление газа;

Q — средний по сечению трубы расход газа;

x — координата сечения трубы, совпадающая с ее осью;

t — координата времени.

Система уравнений (1) может быть сведена к одному нелинейному уравнению в частных производных относительно давления газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} &= \text{sign} \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \sqrt{\left| \frac{\partial P^2}{\partial x} \right|} \\ 0 \leq x \leq 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Точные аналитические решения этого уравнения для наиболее важных и интересных как в теоретическом, так и в инженерном отношении случаев движения газа не получены, т. к. оно не интегрируется в квадратурах. Наиболее эффективным и удобным численным методом решения уравнения нестационарного движения газа по газопроводу на электронных вычислительных машинах является метод конечных разностей. Решению уравнений в частных производных методом конечных разностей посвящены многочисленные работы советских и зарубежных авторов.

Если для решения линейных уравнений в частных производных метод конечных разностей разработан довольно глубоко и полно и получены общие результаты, то для решения нелинейных уравнений в частных производных методом конечных разностей получены весьма разрозненные результаты, и теории их решения в настоящее время далеки до завершения.

Для решения уравнений нестационарной газопередачи (1) предложены многочисленные линеаризации этих уравнений. При решении получающихся линейных уравнений возникают погрешности двух типов: погрешности при решении этих уравнений приближенными методами и погрешности от замены нелинейных уравнений в частных производных линейными.

В диссертации предлагаются численные методы решения на электронных вычислительных машинах точных, а не линеаризованных каким-либо способом, уравнений нестационарной газопередачи. Метод конечных разностей может давать решения с наперед заданной степенью точности. Погрешности, даваемые конечно-разностными уравнениями, могут быть оценены и уменьшены без существенного усложнения вычислений посредством уменьшения шагов по временной и пространственной переменным.

В первой главе для уравнения нестационарного течения газа по газопроводу выводится простейшее, т. н. явное, конечно-разностное уравнение:

$$P_{r,s+1} = P_{r,s} + \alpha \operatorname{sign}(P_{r+1,s} - P_{r-1,s}) \left[\sqrt{|P_{r+1,s}^2 - P_{r,s}^2|} - \sqrt{|P_{r,s}^2 - P_{r-1,s}^2|} \right] \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\Delta t}{\Delta x^3}$$

где

В уравнении (3) $P_{r,s}$ — давление в узле сетки с индексами r и s , а Δt и Δx — шаги по временной и пространственной переменным.

Исследуются устойчивость и сходимость уравнения (3). Это конечно-разностное уравнение оказывается неустойчивым, т. е. непригодным для использования его при расчетах на электронных вычислительных машинах, для тех расчетов движения газа по газопроводу, когда расход газа в какой-либо точке газопровода равен нулю. Поэтому для уравнения нестационарного течения газа по газопроводу выводятся новые, более сложные конечно-разностные уравнения:

$$v(P_{r,s+1} - P_{r,s}) = \text{sign}(P_{r+1,s} - P_{r-1,s}) [a(\sqrt{|P_{r+1,s+1}^2 - P_{r,s+1}^2|} - \sqrt{|P_{r,s}^2 - P_{r-1,s}^2|}) + (1-a)(\sqrt{|P_{r+1,s}^2 - P_{r,s}^2|} - \sqrt{|P_{r,s}^2 - P_{r-1,s}^2|})]$$

$$v(P_{r,s+1} - P_{r,s}) = \text{sign}(P_{r+1,s} - P_{r-1,s}) [a(\sqrt{|P_{r+1,s}^2 - P_{r,s}^2|} - \sqrt{|P_{r,s+1}^2 - P_{r-1,s+1}^2|}) + (1-a)(\sqrt{|P_{r+1,s}^2 - P_{r,s}^2|} - \sqrt{|P_{r,s}^2 - P_{r-1,s}^2|})],$$

$$\text{где } v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{3}{2} \text{ и } 0 \leq a \leq 1.$$

Конечно-разностное уравнение (4) просчитывается справа налево, т. е. от правого граничного условия, а конечно-разностное уравнение (5) — слева направо, т. е. от левого граничного условия.

Эти конечно-разностные уравнения могут использоваться для расчетов любых реальных случаев нестационарного течения газа по газопроводу. Рассматриваются различные частные случаи выведенных конечно-разностных уравнений. Исследуются вопросы их устойчивости и сходимости. Выведены конечные расчетные формулы, удобные для программирования.

Приводятся некоторые из расчетов, выполненных на электронной вычислительной машине для различных методических задач. Это задачи о переходе с одного стационарного режима на другой и об опорожнении. Приводится блок-схема универсальной программы для расчета на электронной вычислительной машине нестационарного течения газа по газопроводу при произвольном начальном распределении давления газа вдоль газопровода и при задании в качестве граничных условий на концах газопровода или графиков потребления и подачи газа в газопровод или изменения во времени давления.

В конце первой главы приводятся примеры расчета работы участков магистральных газопроводов Саратов — Москва и Серпухов — Ленинград при резких изменениях давления и расхода газа на концах этих участков.

По разработанной методике решения уравнения нестационарного течения газа, в газопровode совместно с лабораторией электронных вычислительных машин в настоящее время составлены таблицы для расчетов нестационарного течения газа, предназначенные для широкого круга инженеров и научных работников газовой промышленности. Это таблицы о переходных процессах в газопроводах.

Вторая глава посвящена расчетам нестационарного течения газа по системе газопроводов. В связи с перспективами создания единой системы магистральных газопроводов, охватывающей европейскую часть СССР, Урал, республики Средней Азии и прилегающие к ним районы Сибири, большое значение приобретают расчеты нестационарного течения газа по связанным газопроводам и прогнозирование работы единой системы магистральных газопроводов.

К системе газопроводов здесь относятся также газопроводы с отводами, кольца высокого давления. По разработанной во второй главе методике расчета

нестационарного течения газа по системе газопроводов рассчитывается газовый поток по магистральному газопроводу от месторождения до потребителя, т. е. сюда включается расчет работы линейных участков магистральных газопроводов, расположенных между ними компрессорных станций и городских распределительных станций.

Для решения уравнения нестационарного течения газа по газопроводу, входящему в систему газопроводов, составляется т. н. шеститочечное симметричное уравнение. Для разрешения этого конечно-разностного уравнения применяется метод итерационных циклов, причем в качестве параметра итерации может браться не число, а вектор. Это ускоряет сходимость всего итерационного процесса. Далее исследуются сходимость и устойчивость полученного для уравнения нестационарного течения газа по газопроводу шеститочечного конечно-разностного уравнения.

При расчете нестационарного течения газа по системе газопроводов, состоящей из большого числа участков, возникает вопрос экономии памяти электронной вычислительной машины. Выведенное во второй главе шеститочечное симметричное уравнение более сложно по сравнению с конечно-разностными уравнениями, полученными в первой главе, но зато обладает повышенной точностью. Т. е. для получения той же точности решения можно брать меньшее число участков разбиения по пространственной переменной, а это приводит к существенной экономии памяти машины. Временная и пространственные переменные в уравнении нестационарного течения газа по газопроводу неравноправны в том смысле, что увеличение шага по временной переменной приводит только к уменьшению машинного времени, необходимого для решения задачи, а увеличение шага по пространственной переменной приводит к экономии машинной памяти.

Во второй главе приводятся также окончательные расчетные формулы для расчета нестационарного газового потока по участкам магистрального газопровода при работе компрессорных станций, расположенных между этими участками. Приводятся результаты расчета нестационарного течения газа по двум участкам магистрального газопровода с расположенной между ними компрессорной станцией.

Третья глава посвящена расчетам стационарного течения газа по сложной системе газопроводов: газосборным сетям на промыслах и городским распределительным сетям. При расчетах газосборной промысловой сети рассчитывается работа всей сложной системы «пласт — скважины — газосборная сеть».

Расчеты работы сложных газосборных сетей необходимы не только для прогнозов работы уже действующих сетей, но и для выбора оптимального варианта проектируемых сетей. Эти расчеты могут дать ответы на такие вопросы: каким будет давление на выходах газосборного коллектора при условии отбора из месторождения заданного количества газа или, наоборот, какое количество газа будет отбираться из месторождения при условии задания на выходах газосборного коллектора определенных давлений; в каком месте месторождения наиболее выгодно бурить новые скважины с целью получения максимальных дебитов; в какое место газосборного коллектора выгоднее подключать уже пробуренные скважины и некоторые другие.

Движение газа по газосборной сети описывается двумя группами уравнений. Первая группа уравнений — это уравнения неразрывности, которые дают в каждой точке разветвления газосборной сети условие равенства суммы расходов газа, притекающего в эту точку, сумме расходов газа, вытекающего из нее. Вторая группа уравнений — это уравнения перепада давлений между двумя точками разветвления, связанными участками газосборной сети. Число уравнений равняется числу неизвестных давлений в точках разветвления и расходов по каждому из участков сети. В целях экономии машинной памяти из этой системы исключаются неизвестные расходы газа по участкам и остаются только уравнения, содержащие неизвестные давления газа в точках разветвления. Таким образом «стационарное» течение газа по системе «пласт — скважины—газосборная сеть» описывается нелинейной системой алгебраических уравнений, число которых равняется числу точек разветвления газосборной сети. Т. к. число точек разветвления, участков газосборной сети и скважин на газовых месторождениях достигает нескольких сотен, то, естественно, весь объем вычислений может быть выполнен только при применении электронных вычислительных машин.

После того как из решения системы уравнений, описывающей работу системы «пласт — скважины — газосборная сеть», определены значения давления в точках разветвления сети, определяются остальные характеристики работы всей системы: дебиты скважин, давления на забое и головке каждой скважины и расходы газа по участкам газосборной сети.

Отметим, что направление движения газа по некоторым участкам газосборной сети заранее, до вычислений, может быть неизвестно. Поэтому уравнения, описывающие работу системы «пласт — скважины — газосборная сеть», записываются в такой форме, что направление движения газа по участкам не задается заранее, а определяется в процессе вычислений. Кроме того, такая запись основной системы уравнений позволяет автоматизировать ее составление, т. е. при расчетах работы промысловых газосборных сетей отпадает необходимость вникать в сложную геометрию каждой конкретной сети. Составление уравнений может производиться самой электронной вычислительной машиной при введении информации о числе точек разветвления и порядке соединения их друг с другом участками газосборной сети.

Произведены расчеты прогнозов работы Сев. Ставропольского газового месторождения, имеющего порядка 150 скважин. Определялись дебиты скважин и суммарные отборы газа из месторождения, которые могут быть получены при задании на выходах газосборного коллектора различных значений давления.

Соединение излагаемых во второй и третьей главах результатов по расчету нестационарного течения газа по системе газопроводов и по расчету системы «пласт — скважины — газосборная сеть» позволяет рассчитывать движение газа от пласта до потребителя.

Для решения уравнения нестационарного течения газа по газопроводу предложены многочисленные приближенные методы решения. Несмотря на большое значение этих методов, многие важные и интересные инженерные и теоретические задачи нестационарного течения газа по трубам остаются нерешенными с их помощью, т. к. каждый приближенный метод рассчитан на определенный ограниченный круг задач

и оказывается неприменимым для решения других задач. Получение приближенного аналитического решения задачи нестационарного течения газа по системе связанных газопроводов представляется вообще маловероятным. А если бы такое решение и было получено, то оно было бы настолько громоздким, что практически его было бы невозможно использовать для расчетов работы системы связанных газопроводов.

Все большее значение для дальнейшего прогресса газопроводного транспорта приобретает использование электронных вычислительных машин для всевозможных расчетов нестационарного течения газа по газопроводам. Ввиду большой общности изложенных численных методов решения уравнения нестационарного течения газа по газопроводам по существующим программам могут производиться многочисленные расчеты задач нестационарной газопередачи по магистральным газопроводам и системам газопроводов.

Рассмотрены расчеты нестационарного течения газа по газопроводам при задании на их концах графиков изменения расхода или давления газа. Но большое значение численные методы имеют для постройки управляющих машин. Например, разрабатывается методика решения задачи о нахождении при заданных графиках потребления газа условий подачи газа в магистральный газопровод и работы компрессорных станций, обеспечивающих оптимальность процесса нестационарной газопередачи.

Выводы

В диссертации даются методы расчета на ЭВМ нестационарного течения газа по магистральным газопроводам и системам газопроводов и методы расчета стационарного течения газа по сложным газовым сетям, например, по газосборным сетям на промыслах и городским распределительным сетям.

1. Для решения нелинейного уравнения в частных производных, описывающего нестационарное течение газа по длинному газопроводу, на ЭВМ предлагается простейшее, т. е. явное, конечно-разностное уравнение. Это уравнение дает очень простые окончательные расчетные формулы и весьма удобно для программирования. Но оно неустойчиво, т. е. непригодно для расчетов, при равенстве нулю расхода газа в какой-либо точке газопровода в какой-то момент времени.
2. Выведены новые, более сложные конечно-разностные уравнения, пригодные для расчетов любых случаев нестационарной газопередачи, включая, например, и движения, характеризующиеся постоянством давления вдоль газопровода в какой-то момент времени. Исследуются устойчивость и сходимость полученных конечно-разностных уравнений.
3. Приводятся некоторые из многочисленных задач нестационарного движения газа по магистральным газопроводам. Например, расчет работы участка газопровода Саратов — Москва в условиях суточных изменений расхода и участка газопровода Серпухов — Ленинград в условиях недельных изменений расхода.

4. По разработанной методике решения рассчитаны гидродинамические таблицы переходных процессов в газопроводах.
5. Создана универсальная программа для расчетов нестационарной газопередачи по длинному газопроводу при задании в качестве граничных условий любых конкретных изменений во времени давлений или расходов газа на концах газопровода. Граничные условия могут задаваться в виде таблиц.
6. Для расчетов нестационарного течения газа по системе газопроводов предлагается конечно-разностное уравнение повышенной точности, использование которого экономит память ЭВМ.
7. По разработанной методике расчетов нестационарного течения газа по системе газопроводов может производиться, например, расчет работы нескольких участков магистрального газопровода с расположенными между ними компрессорными станциями, магистральных газопроводов с ответвлениями, колец высокого давления, систем связанных газопроводов.
8. Даются простые расчетные формулы для расчета работы нескольких участков магистрального газопровода с расположенными между ними компрессорными станциями и приводится пример расчета.
9. Поставлена задача расчета стационарного течения газа по сложным газовым сетям. Уравнения, описывающие работу газовых сетей, приводятся к такой форме, что направление движения газа по участкам сети не задается заранее, а определяется в процессе вычислений.
10. Для решения системы уравнений, описывающей работу системы «пласт — скважины — газосборная сеть», предлагается метод итерационных циклов. Исследуются условия сходимости предлагаемого метода решения. Даются формулы для оценки координат векторного параметра итерационного цикла.
11. По излагаемой методике произведены расчеты прогнозов работы Сев. Ставропольского промыслового коллектора. По прогнозному распределению пластового давления на данную дату рассчитываются суммарные отборы газа из месторождения, которые будут получены при задании различных давлений на выходе газосборного коллектора.
12. Соединение результатов второй и третьей глав позволяет рассчитывать нестационарное движение газа от пласта до потребителя.
13. Как дальнейшее развитие излагаемых численных методов решения задач транспорта газа ставится задача оптимизации сетей. Рассматривается задача нахождения минимума металлозатрат в газосборную сеть, рассчитанную на отбор из месторождения заданного количества газа, причем давление на выходе из газосборной сети не должно быть меньше заданной величины. К системе уравнений, выведенных в третьей главе для описания работы газовой сети, добавляются уравнения, число которых на 1 меньше числа участков сети и которые получаются из условия оптимизации сети.

-
14. Большое значение рассматриваемые численные методы решения задач нестационарного течения газа имеют для постройки управляющих машин. Разрабатывается методика нахождения по заданному графику потребления газа основными и попутными потребителями условий подачи газа из месторождения в магистральный газопровод и условий работы компрессорных станций, которые будут обеспечивать оптимальность процесса нестационарной газопередачи.

Список работ автора, опубликованных по теме диссертации.

1. Е. М. Минский, Ю. И. Максимов, А. С. Малых. «К методике решения задач нестационарного движения газа в трубах на быстродействующих вычислительных машинах». Труды ВНИИГАЗА, выпуск 13 (21), 1961.
2. Ю. И. Максимов. «Метод расчета неустановившегося газового потока через пористые среды системой уравнений в конечных разностях с применением итерационных циклов». Труды ВНИИГАЗА, выпуск 18 (26), 1963.
3. Е. М. Минский, Ю. И. Максимов. «Применение электронно-счетных машин для расчета некоторых случаев нестационарного движения газа по магистральным газопроводам». Газовая промышленность, № 9, 1961.
4. Е. М. Минский, Ю. И. Максимов. «Основы расчета сложных газосборных сетей на электронных вычислительных машинах». Газовая промышленность, № 10, 1962.
5. Ю. И. Максимов. «Пример расчета на быстродействующей вычислительной машине нестационарного движения газового потока». Газовая промышленность, № 10, 1962.
6. Ю. И. Максимов. «Новая конечно-разностная схема для расчета нестационарного движения газа по длинным газопроводам». Труды ВНИИГАЗА, выпуск 21 (29), 1964.